

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Lana Šimeg

Zagreb, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Irena Žmak, dipl. ing.

Student:

Lana Šimeg

Zagreb, 2016.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem mentorici doc. dr. sc. Ireni Žmak na iznimnoj pristupačnosti, strpljenju, zalaganju i pomoći prilikom izrade ovog diplomskog rada.

Također zahvaljujem tehničkom suradniku Miodragu Kataleniću na susretljivosti i brojnim savjetima.

Zahvaljujem gospodinu Tomislavu Novoselu iz poduzeća Elektrotehnika d.o.o. na susretljivosti i pomoći pri izradi kalupa za eksperimentalni dio diplomskog rada.

Na kraju bih zahvalila svojim roditeljima, bratu, ujaku i dečku koji su mi pružili veliku potporu tijekom cijelog studija pa tako i sada prilikom izrade ovog diplomskog zadatka.

Lana Šimeg



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **LANA ŠIMEG** Mat. br.: 0035169315

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **IZRADA KALUPA ZA ISPITNA TIJELA ZA MATERIJALE NA BAZI POLIMERA**

Naslov rada na engleskom jeziku: **MOULD MAKING FOR TEST SPECIMENS OF PLASTIC BASED MATERIALS**

Opis zadatka:

Pri ispitivanju mehaničkih svojstava materijala potrebno je slijediti propisane norme. Pritom je potrebno pripremiti ispitna tijela normom propisanih oblika i dimenzija. Kod ispitivanja polimernih materijala i kompozitnih materijala s polimernom matricom i mikro ili nanočesticama punila ili ojačala, često se prethodno izrađuju ploče od ispitnog materijala taljenjem granulata u pravokutnom pločastom kalupu na preši ili se pripremljeni materijali ulijevaju u kalup ukoliko je riječ o suspenziji polimernog materijala s dodanim česticama ojačala ili punila. Nakon prešanja i hlađenja, iz ploča se izrezuju ispitna tijela prema normama te se zatim pristupa ispitivanju mehaničkih svojstava. Kako bi se skratilo vrijeme potrebno za izradu normiranih ispitnih tijela od materijala na bazi polimera, moguće je i izravno prešanje u kalupu koji ima kalupne šupljine prema propisanom obliku i dimenzijama normiranih ispitnih tijela.

U ovom diplomskom radu potrebno je:

- proučiti važeće norme za ispitivanje mehaničkih svojstava polimernih materijala i polimernih kompozita te odrediti potrebne oblike i dimenzije normiranih ispitnih tijela za pojedina mehanička svojstva
- postaviti zahtjeve na kalup za izradu normiranih ispitnih tijela izravnim prešanjem i materijale te definirati kriterije izbora materijala
- izabrati najpovoljniji materijal za izradu kalupa
- postaviti zahtjeve na tehnologiju izrade navedenog kalupa i odrediti kriterije izbora tehnologije izrade
- izabrati najpovoljniju tehnologiju izrade kalupa
- izraditi kalup za izravno prešanje ispitnih tijela.

Zadatak zadan:
12. studenog 2015.

Rok predaje rada:
14. siječnja 2016.

Predviđeni datum obrane:
20., 21. i 22. siječnja 2016.

Zadatak zadao:

Doc. dr. sc. Irena Žmak

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Franjo Cajner

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE	VI
POPIS OZNAKA	VII
SAŽETAK.....	IX
SUMMARY	X
1. UVOD.....	1
2. ISPITIVANJA MEHANIČKIH SVOJSTAVA.....	2
2.1. Rastezna čvrstoća	2
2.2. Savojna čvrstoća	4
2.3. Međuslojna čvrstoća	6
2.4. Tvrdća	7
2.4.1. Brinellova metoda	8
2.4.2. Vickersova metoda.....	10
2.4.3. Rockwellova metoda.....	11
2.5. Udarni rad loma (udarna žilavost)	13
3. IZBOR MATERIJALA ZA KALUP ZA ISPITNA TIJELA ZA MATERIJALE NA BAZI POLIMERA (EPRUVETE)	16
3.1. Analiza funkcionalnih zahtjeva.....	16
3.2. Predizbor materijala za kalup za ispitna tijela na bazi polimera.....	20
3.2.1. Austenitni nehrđajući čelici	26
4. EKSPERIMENTALNI DIO	29
5. IZBOR TEHNOLOGIJE IZRADE KALUPA	33
5.1. Tipovi lasera.....	33
5.1.1. CO ₂ laseri	34
5.1.2. Laser s krutim medijem (Nd:YAG)	35

5.2. Lasersko rezanje.....	36
5.2.1. Lasersko rezanje taljenjem.....	39
5.2.2. Lasersko rezanje kisikom.....	40
5.2.3. Lasersko rezanje isparavanjem	41
5.2.4. Brzina rezanja	42
5.3. AMADA LASMAC – laser za rezanje limova	43
5.4. Ekonomičnost.....	47
6. ZAKLJUČAK.....	49
LITERATURA.....	50
PRILOZI.....	52

POPIS SLIKA

Slika 1.	Način opterećivanja epruvete pri statičkom rasteznom ispitivanju [4]	2
Slika 2.	Epruveta za ispitivanje rastezne čvrstoće, gdje je: L_t – ukupna duljina ispitnog uzorka, mm; L_s – stvarna duljina ispitnog uzorka, mm; L_0 – početna mjerna duljina ispitnog uzorka, mm; h – debljina ispitnog uzorka, mm [2]	3
Slika 3.	Shematski prikaz ispitivanja savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti [6].	5
Slika 4.	Shema ispitivanja prividne međuslojne čvrstoće [3]	6
Slika 5.	Shematski prikaz Brinellove metode ispitivanja tvrdoće [7]	8
Slika 6.	Shematski prikaz promjera kugline kalote (otiska) [7]	9
Slika 7.	Shematski prikaz Vickersove metode ispitivanja tvrdoće [7]	10
Slika 8.	Shematski prikaz Rockwellove HRB metode [7]	12
Slika 9.	Shematski prikaz Rockwellove HRC metode [7]	13
Slika 10.	Shematski prikaz načina udarnog opterećenja epruvete na Charpyjevu batu [8]..	14
Slika 11.	Položaj ispitnog uzorka [8]	15
Slika 12.	Preša PHPVEH 100 za prešanje ispitnih tijela na bazi polimera i kompozita [10]	17
Slika 13.	Karta svojstava: Maksimalna radna temperatura – Tlačna čvrstoća [15]	21
Slika 14.	Karta svojstava: Maksimalna radna temperatura – tlačna čvrstoća [15]	22
Slika 15.	Karta svojstava: Maksimalna radna temperatura i cijena po kg materijala [15] ...	23
Slika 16.	Karta svojstava: Maksimalna radna temperatura – Gustoća [15]	24
Slika 17.	Karta svojstava: Maksimalna radna temperatura i cijena po kg materijala [15] ...	25
Slika 18.	Model za normirana ispitna tijela (prikaz A)	30
Slika 19.	Model za normirana ispitna tijela (prikaz B)	30
Slika 20.	Model kalupa za normirana ispitna tijela (prikaz C)	31
Slika 21.	Model kalupa za normirana ispitna tijela (prikaz D)	31
Slika 22.	Lasersko rezanje CO ₂ laserom [20]	34
Slika 23.	Lasersko rezanje Nd:YAG laserom [22]	35
Slika 24.	Princip laserskog rezanja [24]	36
Slika 25.	Primjena laserskog snopa u obradi materijala rezanjem [25]	37
Slika 26.	Usmjeravanje laserskog snopa u zonu rezanja [25]	38
Slika 27.	Točnost pozicioniranja snopa i točnost izrezane konture [25]	39

Slika 28.	Postupak laserskog rezanja taljenjem [23]	40
Slika 29.	Postupak laserskog rezanja kisikom [23]	41
Slika 30.	Postupak laserskog rezanja isparavanjem [23].....	42
Slika 31.	Poduzeće Elektrotehnika d.o.o. Križevci [27].....	43
Slika 32.	BALLIU MEGACUT 6A – Laser za rezanje i zavarivanje limova (2D i 3D) [27]	44
Slika 33.	AMADA LASMAC – Laser za rezanje limova (2D) [27]	44
Slika 34.	Prikaz rezanja limova AMADA LASMAC laserom [28]	45
Slika 35.	Kalup za normirana ispitna tijela na bazi polimera	45
Slika 36.	Ploče od nehrđajućeg čelika debljine 2 mm	46
Slika 37.	Kalup za normirana ispitna tijela i zaštitne ploče od nehrđajućeg čelika.....	47

POPIS TABLICA

Tablica 1. Tlačne čvrstoće i gustoće konvencionalnih materijala za izradu kalupa [15]	19
Tablica 2. Digitalno logička metoda izračuna faktora važnosti svojstava	20
Tablica 3. Mehanička svojstva (min.) nekih austenitnih nehrđajućih čelika na sobnoj temperaturi [17]	26
Tablica 4. Maseni udjeli ugljika i legiranih elemenata u austenitnim čelicima [17]	27
Tablica 5. Kemijski sastav standardnih vrsta austenitnih nehrđajućih čelika [17]	28
Tablica 6. Kvaliteta reza nekih materijala rezanih Nd:YAG i CO ₂ laserom [18]	36
Tablica 7. Primjena laserskog snopa u obradi materijala [25]	48

POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE

BROJ CRTEŽA Kalup.prt

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A_{cu}	kJ/m^2	udarni rad loma
b	mm	širina ispitnog uzorka
b	mm	širina kalupa
d	mm	promjer otiska
d	mm	Dijagonala
D	mm	promjer kuglice
e	mm	dubina prodiranja penetratora
E	MPa	modul elastičnosti
E_c	J	energija loma
E_s	MPa	savojni modul elastičnosti
F	N	Sila
F	N	sila opterećenja
F_0	N	predopterećenje
F_1	N	glavno opterećenje
F_{\max}	N	maksimalna sila opterećenja
F_p	N	prekidna sila
h	mm	debljina kalupa
h	mm	debljina ispitnog uzorka
h	mm	dubina prodiranja kugle nakon rasterećenja
h_0	mm	dubina prodiranja kuglice
h_1	mm	dubina prodiranja kuglice
h_2	mm	dubina prodiranja kuglice
h_k	mm	dubina prodiranja kuglice
H	MPa	Tvrdoća
HB	-	tvrdoća po Brinellu
HRC	-	tvrdoća po Rockwellu
HV	-	tvrdoća po Vickersu
L	mm	duljina kalupa
L	mm	razmak između oslonaca
L_0	mm	početna duljina epruvete
L_t	mm	ukupna duljina ispitnog uzorka
L_s	mm	stvarna duljina ispitnog uzorka
n	-	broj mjerenja

R_m	MPa	rastezna čvrstoća
R_{ms}	MPa	savojna čvrstoća
S	-	standardna devijacija
S	mm ²	površina kugline kalote
S_0	mm ²	površina početnog presjeka
$\tan \alpha$		nagib pravca
T_R	°C	radna temperatura
X	-	stupanj opterećenja
x_i	-	rezultat mjerenja
ΔL_u	mm	produljenje
ε	mm/mm	istezanje
σ	MPa	naprezanje
τ	MPa	međuslojna čvrstoća

SAŽETAK

Kod određivanja mehaničkih svojstava materijala za kvalitetno provođenje potrebno je držati se propisanih normi struke, kao što je slučaj s izradom kalupa za ispitna tijela za materijale na bazi polimera. U tu svrhu po normama je konstruiran i izrađen pravokutni pločasti kalup od nehrđajućeg čelika u kojeg se ulijeva pripremljena suspenzija, za ispitivanje polimernih i kompozitnih materijala s polimernom matricom i mikro ili nanočesticama punila ili ojačala. Takav kalup skraćuje vrijeme potrebno za izradu normiranih ispitnih tijela od materijala na bazi polimera jer se vrši izravno prešanje u kalupu koji ima kalupne šupljine propisanog oblika i dimenzija namijenjenog za daljnja ispitivanja.

U ovom radu, sukladno normama, detaljno su opisana ispitivanja mehaničkih svojstva za materijale na bazi polimera te napravljen izbor materijala za kalup za ispitna tijela kao i izbor tehnologije za izradu kalupa čime je dobiven konačan proizvod – kalup za normirana ispitna tijela na bazi polimera.

Ključne riječi: kalup, ispitna tijela, mehanička svojstva, polimeri

SUMMARY

When it comes to determination of mechanical properties of a material it is necessary to be in line with the prescribed standards, as it is the case with making molds for polymer based materials. For this purpose a rectangular plate type mold is constructed and crafted. The mold is made of stainless steel in which prepared suspension is flown for testing of polymeric and composite materials with the polymer matrix and the micro or nanoparticles or strengtheners. This type of mold shortens the time required for making standardized polymer based testing samples, since direct compression is performed to the mold that has the prescribed mold cavities and dimensions intended for further testing.

In this thesis, in accordance with the standards, tests for mechanical properties of polymer based materials are thoroughly described. Material selection is made for this kind of mold, intended for producing testing samples. Also, a proper process for mold making was selected. The final product is made – testing samples mold for polymer based materials.

Key words: mold, testing samples, mechanical properties, polymer

1. UVOD

Mehanička svojstva materijala zauzimaju posebno mjesto među ostalim fizikalnim i kemijskim svojstvima, budući da se na osnovi njih dimenzioniraju dijelovi strojeva i uređaja. S pomoću mehaničkih svojstava može se objektivno ocijeniti kvaliteta materijala u primarnoj kontroli poluproizvoda, te u završnoj kontroli proizvoda. Na osnovi nekih mehaničkih i tehnoloških svojstava materijala utvrđuju se tehnološki parametri u proizvodnji. Mehanička svojstva materijala su, kao i sva ostala svojstva, posljedica strukturnog stanja materijala, koje se dobiva obradom materijala određenog sastava određenim tehnološkim postupkom. Tako se izborom materijala i odgovarajućeg tehnološkog postupka postiže ciljano strukturno stanje materijala koje daje željena svojstva.

Na području ispitivanja mehaničkih svojstava razvijena je eksperimentalna oprema s pomoću koje je moguće epruvete opterećivati na način sličan onome na koji će odgovarajući strojni dijelovi biti opterećeni tokom eksploatacije. Epruvete su uzorci na kojima se provode ispitivanja, normiranog su oblika i dimenzija. Tako se epruvete prilikom ispitivanja naprežu vlačno, tlačno, savojno ili uvojno. [1]

Kod ispitivanja polimernih materijala i kompozitnih materijala s polimernom matricom i mikro i nanočesticama punila i ojačala, često se prethodno izrađuju ploče od ispitnog materijala taljenjem granulata u pravokutnom pločastom kalupu na preši ili se pripremljeni materijali ulijevaju u kalup ukoliko je riječ o suspenziji polimernog materijala s dodatnim česticama ojačala ili punila. Nakon prešanja ili hlađenja, iz ploča se izrezuju ispitna tijela prema normama te se zatim pristupa ispitivanju mehaničkih svojstava. Kako bi se skratilo vrijeme potrebno za izradu normiranih ispitnih tijela od materijala na bazi polimera, moguće je izravno prešanje u kalupu koji ima kalupne šupljine prema propisanom obliku i dimenzijama normiranih ispitnih tijela.

Kalup je alat koji ima funkciju temperiranja, kalupljenja i očvršćivanja, tj. oblikovanja bez odvajanja čestica.

U nastavku rada detaljno je opisan odabir vrste materijala i tehnologije izrade kalupa, te konačan proizvod – kalup za normirana ispitna tijela na bazi polimera.

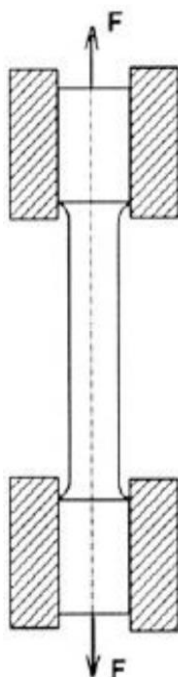
2. ISPITIVANJA MEHANIČKIH SVOJSTAVA

U strojarstvu temeljna svojstva materijala su mehanička: čvrstoća, granica razvlačenja, istezljivost, žilavost, tvrdoća i sl. Mehaničko svojstvo materijala predstavlja mjerljivu veličinu materijala, koja se može brojčano odrediti pomoću normiranih metoda ispitivanja. [2]

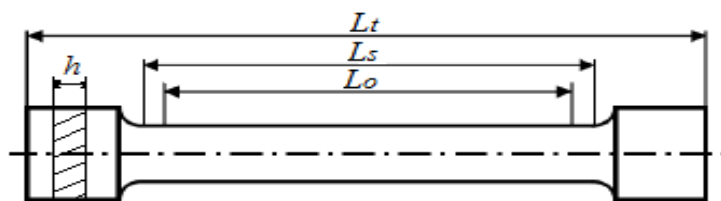
Za polimerne materijale i kompozitne materijale s polimernom matricom i mikro i nanočesticama punila i ojačala, napravljen je poseban kalup namijenjen za izradu tri vrste epruveta, a u nastavku su detaljno opisana mehanička svojstva koja se najčešće ispituju na epruvetama.

2.1. Rastezna čvrstoća

U uvjetima normalnog jednoosnog rasteznog statičkog naprezanja, osnovna mehanička svojstva utvrđuju se statičkim rasteznim pokusom. Ispitivanje se provodi na kidalicama ili univerzalnim ispitivalicama na kojima se epruvete kontinuirano rastezno opterećuju do loma, kao što je prikazano na slici 1. [3] Pri ispitivanju se kontinuirano mjere sila i produljenje epruvete. Statičkim rasteznim pokusom utvrđuju se osnovna mehanička svojstva kao što su granica razvlačenja, vlačna čvrstoća, modul elastičnosti, istezljivost, suženje itd. Dimenzije epruvete za polimerne materijale određene su u skladu s normom HRN EN ISO 527-4:2008.



Slika 1. Način opterećivanja epruvete pri statičkom rasteznom ispitivanju [4]



Slika 2. Epruveta za ispitivanje rastezne čvrstoće, gdje je: L_t – ukupna duljina ispitnog uzorka, mm; L_s – stvarna duljina ispitnog uzorka, mm; L_0 – početna mjerna duljina ispitnog uzorka, mm; h – debljina ispitnog uzorka, mm [2]

Rastezna čvrstoća računa se prema izrazu:

$$R_m = \frac{F_{max}}{S_0}$$

gdje je:

R_m – rastezna čvrstoća, MPa

F_{max} – maksimalna sila opterećenja, N

S_0 – površina početnog presjeka, mm²

Modul elastičnosti računa se prema izrazu:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

gdje je:

E – modul elastičnosti, MPa

σ – naprezanje, MPa

ε – produljenje, mm/mm

Vrijednost istezanja nakon loma epruvete određuje se izrazom [5]:

$$\varepsilon = \frac{L_u - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L_u}{L_0}$$

gdje je:

ΔL_u – produljenje, mm

L_0 – početna duljina epruvete, mm

Aritmetička sredina je suma svih vrijednosti (npr. rezultata mjerenja) podijeljena s brojem vrijednosti [5]:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

gdje je:

x_i – rezultat mjerenja,

n – broj mjerenja (rezultata mjerenja)

Procijenjena standardna devijacija mjera je za prosječno odstupanje svakog podatka od aritmetičke sredine [5]:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

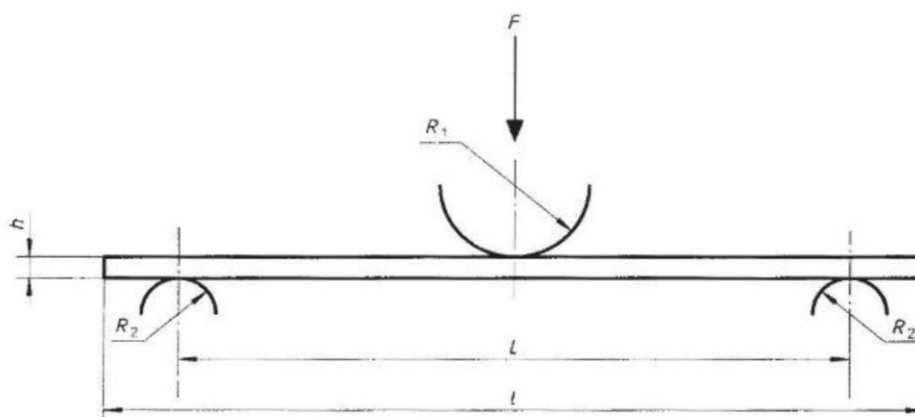
gdje je:

S – standardna devijacija

2.2. Savojna čvrstoća

Epruvete za ispitivanje savojne čvrstoće mogu biti pravokutnog ili okruglog poprečnog presjeka, a sam oblik i dimenzije epruvete ovise o vrsti materijala koji se ispituje. Kako se radi o polimerima i kompozitima, ovaj kalup je predviđen za izradu epruveta pravokutnog poprečnog presjeka.

Ispitivanje se može provoditi savijanjem u tri ili četiri točke. Kod ispitivanja savijanjem u tri točke epruveta se postavlja na dva oslonca, a po sredini epruvete se djeluje silom F koja uzrokuje progib epruvete. Prilikom ispitivanja bilježe se trenutna sila i progib. Ispitivanje se provodi do pucanja epruvete. Naziv za ovakvo ispitivanje je tro-točkasto ispitivanje ili ispitivanje savijanja u tri točke. [3] Shema ispitivanja je prikazana na slici 3.



Slika 3. Shematski prikaz ispitivanja savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti [6]

Izraz za dobivanje vrijednosti savojne čvrstoće:

$$R_{ms} = \frac{3 \cdot F_p \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2}$$

gdje je:

R_{ms} – savojna čvrstoća, MPa

F_p – prekidna sila, N

L – razmak između oslonca, mm

b – širina ispitnog uzorka, mm

h – debljina ispitnog uzorka, mm

U dijagramu naprezanje – istezanje ($\sigma - \varepsilon$) modul elastičnosti određuje se iz nagiba pravca približno linearnog područja. U linearnom (elastičnom) dijelu vrijedi Hookeov zakon: $\sigma = E\varepsilon$. Kada se rezultati mjerenja prikazuju u dijagramu sila – progib ($F - f$), savojni modul elastičnosti računa se prema izrazu:

$$E_s = \frac{\Delta F}{\Delta f} \cdot \frac{L^3}{4 \cdot b \cdot h^3}$$

Nagib pravca određuje omjer promjene sile i progiba:

$$\frac{\Delta F}{\Delta f} = \operatorname{tg} \alpha$$

Izraz za savojni modul elastičnosti tada se može zapisati kao:

$$E_s = \tan \alpha \cdot \frac{L^3}{4 \cdot b \cdot h^3}$$

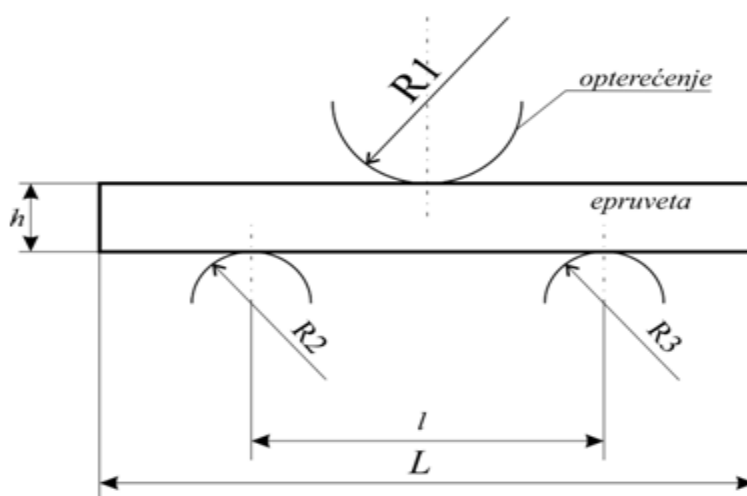
gdje je:

E_s – savojni modul elastičnosti, MPa

$\tan \alpha$ – nagib pravca [3]

2.3. Međuslojna čvrstoća

Mjera za kvalitetu granične površine, odnosno međusloja, jest međuslojna smična čvrstoća. Ona ovisi o čvrstoći prijanjanja između vlakna za ojačanje i osnove te o veličini dodirnih površina vlakana i adhezije na tim površinama. Razumljivo je da je dobra adhezija potrebna duž cijele granične površine vlakana za ojačanje i osnove, upravo zato da bi se što veće opterećenje moglo prenijeti s polimerne osnove na vlakna za ojačanje. Istraživanje granične površine vlakno – osnova i međusloja ta dva gradbena materijala vlaknima ojačanog kompozita iznimno je važno za njihovo što čvršće povezivanje, a to izravno utječe na svojstva vlaknima ojačanih kompozita. Time se povećava mogućnost mehaničkog opterećenja i novih konstrukcijskih rješenja u praksi. [6] Norma EN ISO 14130 : 1997 propisuje izradu epruveta pravokutnog poprečnog presjeka. Epruveta se opterećuje tro-točkastim savijanjem, ali s malim razmakom oslonca što je prikazano na slici 4.



Slika 4. Shema ispitivanja prividne međuslojne čvrstoće [3]

Ispitivanja se provode na univerzalnoj kidalici prilikom čega omjer debljine uzorka i razmaka među osloncima mora biti mali kako bi se povećao udio smičnih naprezanja i time potaknuo lom na dodirnoj površini između ojačala i matrice.

Prividna međuslojna čvrstoća računa se prema izrazu:

$$\tau = \frac{3 \cdot F_{max}}{4 \cdot b \cdot h}$$

gdje je:

τ – prividna međuslojna čvrstoća, MPa

F_{max} – maksimalna sila, N

h – debljina ispitnog uzorka, mm

b – širina ispitnog uzorka, mm [3]

2.4. Tvrdoća

Tvrdoća je otpornost materijala prema prodiranju drugog, znatnije tvrdog tijela. Ispitivanje tvrdoće tek neznatno oštećuje površinu ispitivanog predmeta, pa se općenito može svrstati među nerazorna ispitivanja. Za samo ispitivanje ne treba izraditi posebnu epruvetu, nego samo odgovarajuće pripremiti plohe uzorka ili strojnog dijela. Osnovni princip mjerenja kod većine metoda je mjerenje veličine ili dubine otiska što ga penetrator (indentor ili utiskivač), opterećen nekom silom, načini u ispitivanom materijalu. Penetratori ili indentori oblika su kuglice, stošca ili piramide, a izrađeni su od tvrdih materijala (kaljeni čelik, tvrdi metal ili dijamant). [1]

Tvrdoća se računa prema sljedećem izrazu:

$$H = \frac{1}{\pi \cdot D} \cdot \frac{F}{h_k}$$

gdje je:

H – tvrdoća, MPa

D – promjer kuglice, mm

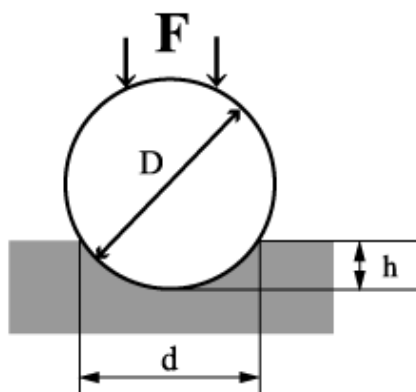
F – sila opterećenja, N

h_k – dubina prodiranja, mm [3]

Kod danas najčešće primjenjivanih metoda za mjerenje tvrdoće (Brinell, Vickers, Rockwell), djelovanje sile je statičko. Kod nekih drugih, rjeđe primjenjivanih postupaka mjerenja tvrdoće, djelovanje sile je dinamičko (Baumann, Poldi, Shore). [1]

2.4.1. Brinellova metoda

Ova metoda se koristi za meke i srednje tvrde materijale. Kod ove metode penetrator je kuglica od kaljenog čelika (za tvrdoće do 450 HB) ili tvrdog metala (za tvrdoće do 650 HB) promjera D koja se utiskuje silom F u površinske slojeve materijala. [7]



Slika 5. Shematski prikaz Brinellove metode ispitivanja tvrdoće [7]

U ispitivanom materijalu nastaje otisak u obliku kalote promjera baze d i dubine h . Tvrdoća po Brinellu (oznaka HB) je omjer primijenjene sile F i površine kalote otiska S :

$$HB = \frac{F \cdot 0,102}{S} = \frac{F \cdot 0,102}{\pi \cdot D \cdot h}$$

Budući da se Brinellovom metodom ne mjeri dubina prodiranja kuglice h nego promjer kalote d , izraz za izračun tvrdoće je:

$$HB = \frac{F \cdot 0,204}{\pi \cdot D \cdot \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)}$$

gdje je:

HB – tvrdoća po Brinellu

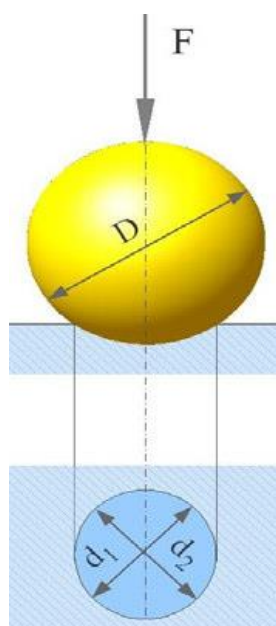
F – sila, N

S – površina kugline kalote, mm^2

D – promjer kuglice, mm

h – dubina prodiranja kuglice nakon rasterećenja, mm

d – promjer kalote (otiska), mm [7]



Slika 6. Shematski prikaz promjera kugline kalote (otiska) [7]

Normirani promjeri kuglice D su 10, 5, 2,5, 2 i 1 mm, a mjerenje je valjano ako promjer otiska d iznosi od 0,25 do 0,6 D , pa u ovisnosti o tvrdoći materijala treba varirati i silu F . [7]

Zbog toga je uveden stupanj opterećenja:

$$X = \frac{F \cdot 0,102}{D^2}$$

gdje je:

X – stupanj opterećenja

F – sila, N

D – promjer kuglice, mm

Prednosti:

- Jednostavna priprema površine
- Lako mjerenje promjera otiska

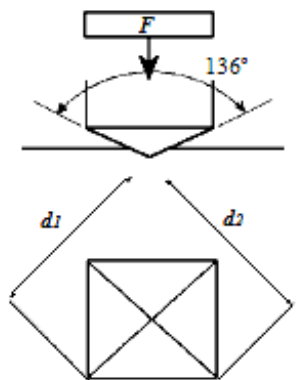
Nedostaci:

- Ne mogu se mjeriti tvrdoće > 650 HB
- Tvrdoća je ovisna o opterećenju i prema X (stupnju opterećenja) potrebno je izabrati odgovarajuću silu F
- Nakon mjerenja otisak je velik i ostavlja vidljiv trag [7]

2.4.2. Vickersova metoda

Kod Vickersove metode uklonjena su dva osnovna nedostatka Brinellove metode: ograničenost područja mjerenja i ovisnost tvrdoće o sili utiskivanja.

Ova metoda je slična Brinellovoj. Razlika je u tome što je penetrator četverostrana istostranična dijamantna piramida s vršnim kutom od 136° . Vickersova metoda je univerzalna i primjenjuje se za tvrde i meke materijale. [7]



Slika 7. Shematski prikaz Vickersove metode ispitivanja tvrdoće [7]

Po definiciji, tvrdoća po Vickersu jednaka je onoj po Brinellu a izračunava se prema izrazu:

$$HV = \frac{F \cdot 0,102}{S}$$

Kod Vickersove metode površina otisnuća se računa pomoću dijagonale $d = (d_1 + d_2)/2$, mm:

$$HV = \frac{0,189 \cdot F}{d^2}$$

gdje je:

HV – tvrdoća po Vickersu

F – sila, N

d – dijagonala, mm

Trajanje opterećenja iznosi 10 do 15 s, a iznimno za mekane materijale može se produžiti. Smanjivanjem sile utiskivanja povećava se rasipanje rezultata, što je posebno izraženo kod ispitivanja mikrotvrdoće.

Prednosti:

- Univerzalna metoda
- Moguće je mjerenje vrlo tankih i vrlo tvrdih materijala

Nedostaci:

- Potrebna posebna priprema ispitne površine
- Potreban mjerni mikroskop za očitavanje dijagonala otiska
- Mogućnost loma dijamantne piramide [7]

2.4.3. Rockwellova metoda

Za razliku od Brinellove i Vickersove metode, kod Rockwellove metode se ne mjeri veličina otisnuća, nego dubina prodiranja penetratora. Kod ove metode se vrijednost tvrdoće očitava neposredno na skali tvrdomjera nakon rasterećenja.

Upotrebljava se više vrsta penetratora:

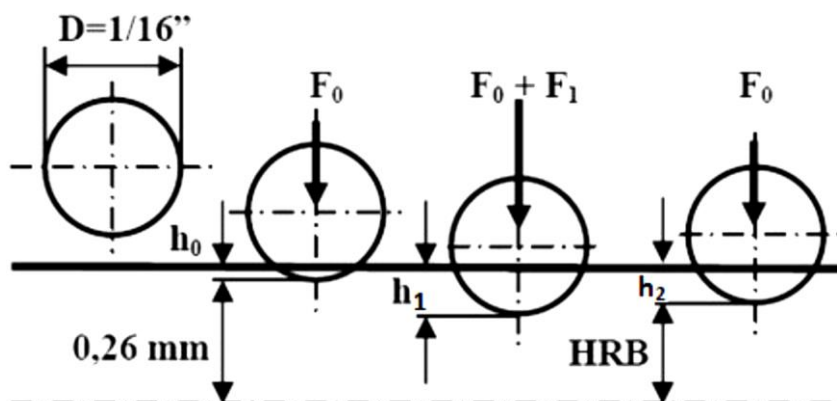
- Za meke materijale upotrebljava se mala čelična kuglica (HRB metoda)
- Za tvrde materijale upotrebljava se dijamantni stožac (HRC metoda)

Trajanje jednog ispitivanja je 10 sekundi. [7]

Rockwell HRB metoda se koristi za meke i srednje tvrde materijale. Postupak mjerenja tvrdoće odvija se u tri faze:

1. Prva faza – predopterećenje $F_0 = 98$ N, penetrator (čelična kuglica) prodire na dubinu h_0 koja predstavlja početni položaj za mjerenje dubine prodiranja.

2. Druga faza – glavno opterećenje $F_1 = 883 \text{ N}$ koje se dodaje na predopterećenje ($F_0 + F_1 = 981 \text{ N}$) utiskuje penetrator na dubinu h_1 .
3. Treća faza – rasterećenje, tj. otklanjanje glavnog opterećenja F_1 . Dolazi do povrata elastičnih deformacija u uzorku nastalih u drugoj fazi i penetrator se zaustavlja na dubini h_2 ($h_2 < h_1$). [7]



Slika 8. Shematski prikaz Rockwellove HRB metode [7]

Tvrdoća po HRB metodi određuje se prema izrazu:

$$HRB = 130 - \frac{e}{0,002}$$

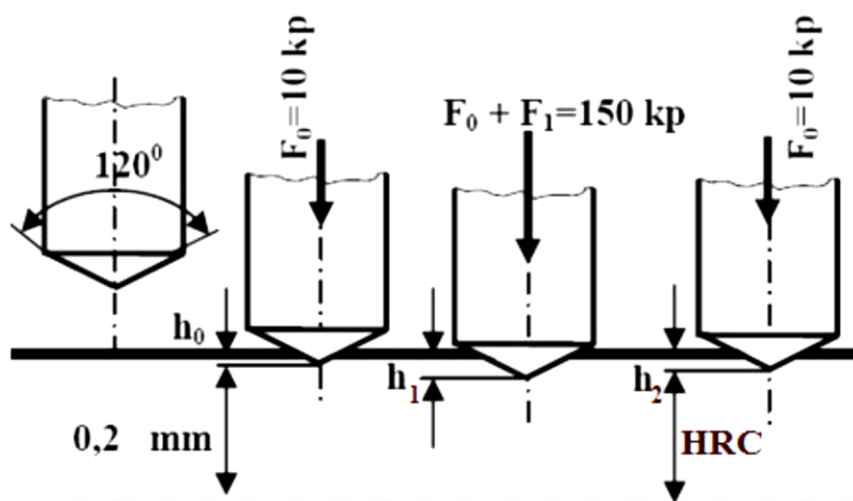
gdje je:

e – dubina prodiranja penetratora, mm ($e = h_2 - h_0$)

Mjerno područje HRB metode je od 35 do 100 HRB.

Rockwell HRC metoda se koristi za tvrde materijale. Postupak mjerenja tvrdoće se odvija se u tri faze:

1. Prva faza – predopterećenje $F_0 = 98 \text{ N}$, penetrator (dijamantni stožac) prodire na dubinu h_0 , tj. početni položaj mjerenja.
2. Druga faza – glavno opterećenje $F_1 = 1373 \text{ N}$ koje se dodaje na predopterećenje ($F_0 + F_1 = 1471 \text{ N}$) utiskuje penetrator na dubinu h_1 .
3. Treća faza – rasterećenje, tj. otklanjanje glavnog opterećenja F_1 . Dolazi do povrata elastičnih deformacija u uzorku nastalih u drugoj fazi i penetrator se zaustavlja na dubini h_2 ($h_2 < h_1$). [7]



Slika 9. Shematski prikaz Rockwellove HRC metode [7]

Tvrdoća po HRC metodi određuje se prema izrazu:

$$HRC = 100 - \frac{e}{0,002}$$

gdje je :

e – dubina prodiranja penetratora, mm ($e = h_2 - h_0$)

Mjerno područje HRC metode je od 20 do 70 HRC.

Prednosti:

- Veća brzina mjerenja tvrdoće
- Neposredno očitavanje tvrdoće na uređaju
- Plitak otisak

Nedostaci:

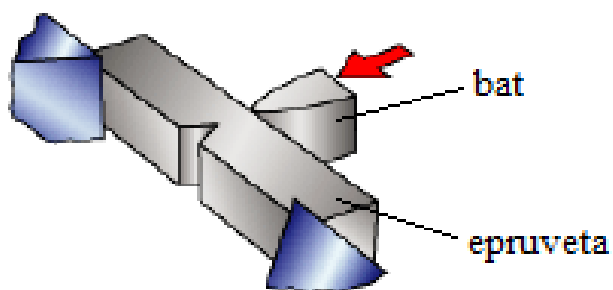
- Mogućnost loma dijamantnog stošca
- Nepreciznost ± 2 HRB/HRC [7]

2.5. Udarni rad loma (udarna žilavost)

Ispitivanjem udarnog rada loma utvrđuje se ponašanje metalnih i polimernih materijala u uvjetima udarnog opterećenja. Ispitivanje se provodi na epruvetama s utorom te se na taj

način postiže višeosno stanje naprezanja u korijenu utora. Vrijednost udarnog rada loma pokazuje hoće li se materijal ponašati žilavo ili krhko u uvjetima udarnog opterećenja. Ispituje se često pri sniženim temperaturama jer kod nekih materijala temperatura signifikantno utječe na iznos udarnog rada loma.

Ispituju se epruvete četvrtastog poprečnog presjeka, s utorom u sredini (ili bez njega), a opterećuju se na Charpyjevu batu (slika 10.). Epruveta oslonjena na dva oslonca, savojno se opterećuje udarcem brida bata u sredini raspona nasuprot utoru. Uslijed udarca epruveta puca u korijenu utora ili je oštrica bata provlači savinutu, ali ne slomljenu, između oslonaca. [1]



Slika 10. Shematski prikaz načina udarnog opterećenja epruvete na Charpyjevu batu [8]

Udarni rad loma (udarna žilavost) računa se prema izrazu:

$$A_{cu} = \frac{E_c}{b \cdot h} \cdot 10^3$$

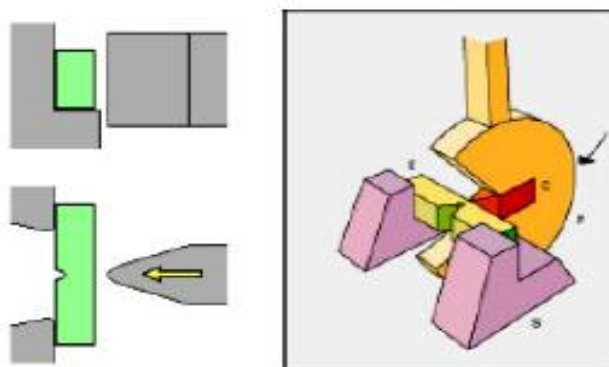
gdje je:

A_{cu} – udarna žilavost, kJ/m²

E_c – energija loma, J

b – širina ispitnog uzorka, mm

h – debljina ispitnog uzorka, mm [3]



Slika 11. Položaj ispitnog uzorka [8]

Zbog udarca ispitni uzorak pukne u korijenu utora ili ga oštrica bata provuče između oslonca. Dva najčešće korištena oblika ispitnog uzorka pri ispitivanju udarnog rada loma su:

- Ispitni uzorak s U-zarezom
- Ispitni uzorak s V-zarezom

Zarez koji se nalazi u sredini ispitnog uzorka osigurava da se lom dogodi baš na tom mjestu. Ispitni uzorak s V-zarezom upotrebljava se za ispitivanje žilavih materijala, a ispitni uzorak s U-zarezom se upotrebljava za ispitivanje krhkih materijala. [8]

3. IZBOR MATERIJALA ZA KALUP ZA ISPITNA TIJELA ZA MATERIJALE NA BAZI POLIMERA (EPRUVETE)

Izbor materijala prisutan je u svakom dijelu procesa konstruiranja i važan je za sva zbivanja u ukupnom vijeku trajanja proizvoda, a zbog toga je raspolaganje sa što potpunijim informacijama o svojstvima materijala bitno za stvaranje i razvoj proizvoda, a posebno tehničkih tvorevina.

Izbor optimalnog materijala važan je sastavni dio procesa stvaranja i razvoja proizvoda. Kvalitetniji proizvod sa što boljim uporabnim svojstvima, dopadljivim izgledom, nižom cijenom i uz što veću dobit, moguće je postići unapređivanjem proizvodnih postupaka izrade i konstrukcijskih rješenja uz pravilan izbor materijala. Ispravan odabir uključuje u razmatranje različite kriterije i zahtjeve funkcije, proizvodnje i primjene proizvoda, ali i zahtjeve tržišta. [9]

3.1. Analiza funkcionalnih zahtjeva

Osnovna funkcija kalupa je oblikovanje bez odvajanja čestica, tj. mora omogućiti temperiranje, kalupljenje i očvršćivanje nekog prerađivanog materijala.

Ovisno o prerađivanom materijalu, kalup se koristi ili pri malo povišenim radnim temperaturama ($T_R < 200\text{ °C}$) ili pri povišenim temperaturama ($T_R > 200\text{ °C}$).

Kalup za normirana ispitna tijela radi pri temperaturi između 20 °C – 230 °C , što je ujedno i temperatura taljenja većine polimernih materijala. Preša je uređaj pomoću kojeg se mogu proizvesti vrlo velike sile tlačenja, oblikovanja i sl.

Preša koja se koristi za prešanje polimernih i kompozitnih materijala na Katedri za preradbu polimera i drva Fakulteta strojarstva i brodogradnje nazivne je snage 90 tona, tlak u preši je oko 200 bar, a zagrijavati se može do maksimalnih 230 °C . Preša ima dva radna stola, postavljeni jedan ispod drugog. Na slici 12. prikazana je preša u kojoj će se koristiti kalup za pripremu normiranih ispitnih tijela.



Slika 12. Preša PHPVEH 100 za prešanje ispitnih tijela na bazi polimera i kompozita [10]

Kako bi se pravilno odabrao materijal za kalup, postoji nekoliko utjecajnih čimbenika o kojima ovisi mogućnost ispunjavanja osnovne funkcije kalupa, a najvažniji među njima su:

- Žilavost
- Otpornost na trošenje

Žilavost je sposobnost materijala da se plastično deformira bez pucanja. [11]

Kod žilavih materijala dolazi do znatnije plastične deformacije prije samog loma. Suprotno svojstvu žilavosti je krhkost gdje pri uvjetima udarnog opterećenja lom nastupa bez vidljive plastične deformacije. U pravilu rastezljivi metali su žilaviji, ali to ne smije biti presudan podatak pošto se rastezljivost odnosi na statičko ispitivanje rastezanjem uzorka, dok je žilavost svojstvo povezano s udarnim opterećenjem. [12]

S obzirom da u preši djeluje tlak od 200 bar i temperatura do 230 °C, ne smije doći do deformacije i pucanja kalupa, stoga je važno da materijal za kalup bude žilav.

Otpornost na trošenje je svojstvo ležajnog materijala u tribološkom sustavu da se opire trošenju. [11]

Sama pojava trošenja se generira na mehanički i/ili kemijski način i općenito gledano se ubrzava kod trenja. Trošenje uključuje osnovne fenomene koji svi imaju zajedničko svojstvo

uklanjanja čvrstog materijala s površine. U većini slučajeva do trošenja dolazi površinskim interakcijama na neravninama.

Posljedica trošenja materijala može biti potpuno uklanjanje materijala s površine ili pak premještanje materijala na dodirnim površinama. Gubitak materijala raste kako napreduje oštećenje materijala kod trošenja. [13]

Najčešći mehanizmi trošenja su adhezijsko i abrazijsko trošenje.

Adhezijsko trošenje se generira pri slučajevima gdje je ključna adhezija (međusobno spajanje) dodirnih površina, kada su dva normalno čvrsta tijela u kontaktu klizanjem, bez ili sa podmazivanjem. Adhezijsko trošenje nastupa kada se neravnine – izbočine uslijed klizanja u kontaktu smiču, što može rezultirati odvajanjem dijelova s jedne i dodatno "naljepljivanjem" dijelova jedne površine na drugu površinu.

Abrazijsko trošenje brušenjem nastaje kada neravni dijelovi hrapave tvrde površine ili tvrde čestice klize po mekšoj površini i oštećuju površinu uz pomoć plastične deformacije ili loma. Mehanizmi adhezijskog i abrazijskog trošenja uglavnom su djelotvorni za vrijeme direktnog fizičkog kontakta dviju površina. No ako su površine odvojene kapljevitim filmom (isključenost abrazijskih čestica), ti mehanizmi trošenja ne djeluju. [13]

Za izbor materijala za kalup za ispitne uzorke važno je odabrati čelik legiran s jakim karbidotvorcima (Cr, W, V, Mo) koji imaju vrlo visoku otpornost na trošenje.

Otpornost na trošenje je eksploatacijsko svojstvo koje utječe na radni vijek i jednostavnost održavanja kalupa za ispitne uzorke.

Osim općih zahtjeva na kalupne materijale slijede i neki posebni zahtjevi koji su jednako važni za izbor materijala za kalup:

- Otpornost na popuštanje
- Kaljivost
- Dimenzijska stabilnost u radu
- Veličina austenitnog zrna
- Postojanost dimenzija pri kaljenju
- Prikladnost za poliranje
- Otpornost na koroziju
- Gustoća

Otpornost na popuštanje je zahtjev za alate koji rade pri povišenim temperaturama (kokile, ukovnji, rezni alati itd.). Povišena temperatura uzrokuje veći ili manji pad čvrstoće ili tvrdoće te otpornosti na trošenje.

Kaljivost:

- a) *Zakaljivost* – ovisi o udjelu ugljika koji je otopljen u austenitu
- b) *Prokaljivost i prokaljenost* – prokaljivost ovisi o udjelu ugljika i legirajućih elemenata, a prokaljenost ovisi o dimenzijama alata i intenzivnosti gašenja

Dimenzijska stabilnost u radu – do promjene oblika alata u radu dolazi zbog visokih naprezanja ispod ili iznad granice elastičnosti R_e . Rješenje je povećanje kritičnog presjeka A ili odabir materijala s povišenom žilavošću.

Veličina austenitnog zrna – prilikom ugrijavanja na temperaturu austenitizacije, a nakon prekoračenja temperature transformacije A_1 , nastaju austenitna zrna koja počinju rasti uslijed daljnjeg povišenja temperature i produljenja vremena držanja na povišenoj temperaturi. Teži se da austenitna zrna ostanu što sitnija, jer o njihovoj veličini ovisi i veličina martenzitnih zrna, tj. duktilnost nakon toplinske obrade. Rast austenitnih zrna sprječava se prisutnošću toplinski otpornih, sitnih i jednako disperziranih karbidnih čestica po granicama zrna.

Postojanost dimenzija pri kaljenju – kod kaljenja zbog transformacije austenita dolazi do povećanja volumena, tj. do deformacije alata. Bezdeformacijsko kaljenje važno je za one alate, koji se nakon kaljenja više ne mogu brusiti: precizni kalupi s finim gravurama, komplicirane rezne ploče štanca, profilni alati, odvalna i modulna glodala. [14]

Gustoća materijala je također bitna zbog jednostavnosti korištenja kalupa za ispitna tijela, pa se traži da ona bude što niža.

Tablica 1. Tlačne čvrstoće i gustoće konvencionalnih materijala za izradu kalupa [15]

Materijal	Tlačna čvrstoća, (MPa)	Gustoća, (kg/m ³)
Aluminij	280-325	2700
Nehrđajući čelik	170-1000	7800
Ugljični čelik	290-395	7800

Također treba uzeti u obzir proizvodne i ekonomske zahtjeve:

- Mogućnost nabavke
- Cijena čelika

- Obradivost odvajanjem čestica
- Otpornost na razugljičenje

Mogućnost nabavke – u ukupnoj masi proizvedenih čelika, alatni čelici zauzimaju samo približno 1 – 2 % mase, što uzrokuje povremene teškoće pri hitnim nabavkama, a s obzirom na relativno visok asortiman kvaliteta (vrsta) alatnih čelika.

Cijena čelika igra sekundarnu ulogu. Štednja na troškovima alatnih čelika ne donosi obično znatnije uštede, nego čak obrnuto: kod jeftinijih kvaliteta visok je udio škarta pri toplinskoj obradi, pa često treba neki alat izrađivati ponovo, čime se povećavaju direktni troškovi materijala i izrade, ali i indirektni kao posljedica zakašnjenja isporuke alata.

Obradivost odvajanjem čestica – teškoće pri obradi rezanjem mogu nastupiti kod tokarenja ili brušenja visokougličnih čelika. Rješenje je sferoidizacijsko žarenje (meko žarenje).

Otpornost na razugljičenje – sklonost ka razugljičenju raste s povišenjem temperature austenitizacije i višim udjelom ugljika. [14]

3.2. Predizbor materijala za kalup za ispitna tijela na bazi polimera

U prethodnom poglavlju prikazani su funkcionalni zahtjevi na kalupne materijale i njihova svojstva.

Budući da postoji veći broj utjecajnih zahtjeva i svojstava, kako bi se olakšao predizbor materijala najprije je provedena digitalno-logička metoda izračuna važnosti svojstava. [16]

Svojstva koja ulaze u predizbor su: *žilavost (KV)*, *otpornost na trošenje (OT)*, *gustoća (ρ)*, *kemijska postojanost (KP)*, *cijena (C_m)*.

Ukupan broj svojstava iznosi $N = 5$, a ukupan broj pitanja za digitalno-logičku metodu $N(N-1)/2 = 15$.

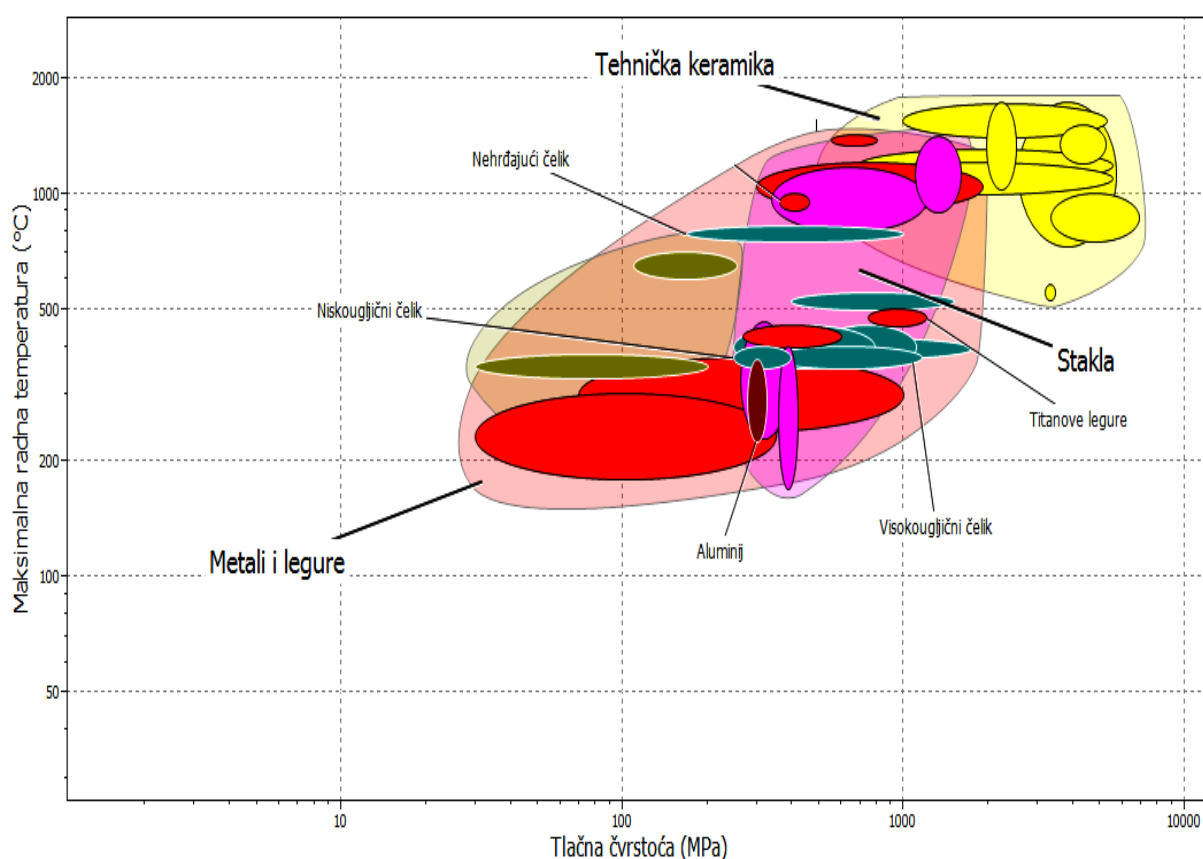
Tablica 2. Digitalno-logička metoda izračuna faktora važnosti svojstava

Svojstvo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Pozitivne odluke	Faktor važnosti
KV	1	1	1	1	1											5	0,33
OT	0					1	1	1	1							4	0,27
ρ		0				0				0	0	1				1	0,07
KP			0				0			1			1	1		3	0,20
C_m				0				0			1		0		1	2	0,13
Ukupno																15	1,00

Provedbom digitalno logičke metode i izračunom faktora važnosti slijedi da je najvažnije svojstvo žilavost s 33 % utjecaja, potom otpornost na trošenje s 27 % utjecaja, kemijska postojanost s 20 % utjecaja, cijena materijala s 13 % utjecaja, a gustoća sa 7 % utjecaja može se smatrati manje važnim svojstvom pri izboru materijala za izradu kalupa.

Predizbor materijala obavljen je pomoću programskog paketa CES EduPack 2009, postavljanjem kriterija prema traženim svojstvima, na osnovu čega su zatim eliminirani nepodobni materijali.

Uzimajući u obzir karakteristike preše, od kojih su najvažniji tlak i temperatura, prvi korak jest postavljanje kriterija žilavosti, a uzima se minimalna tlačna čvrstoća od 200 MPa. Uz to, postavlja se i kriterij maksimalne radne temperature od 230 °C. Broj materijala koji dolaze u obzir smanjuje se na 29 od prvotnih 98. Zatim, eliminirajući sve nemetale, broj preostalih metalnih materijala smanjen je na 14 od 98 (slika 13.).



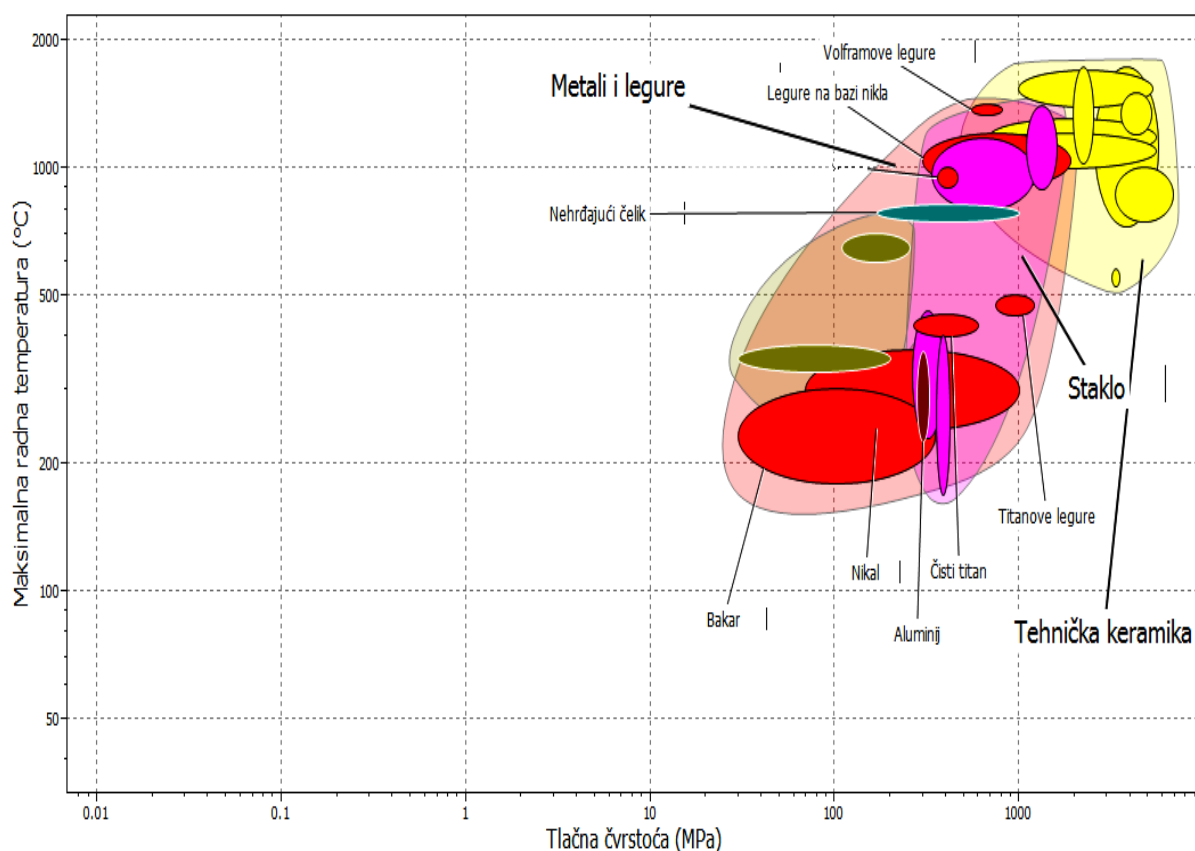
Slika 13. Karta svojstava: Maksimalna radna temperatura – tlačna čvrstoća [15]

Na karti svojstava među metalnim materijalima pojavljuju se nehrđajući čelik, aluminij i niskougljični čelik, čija su svojstva navedena u tablici 1.

Idući korak je postavljanje kriterija otpornosti na trošenje i kemijske postojanosti materijala na medije s kojima je kalup u kontaktu.

Prilikom upotrebe kalupa potrebno je kalup premazati silikonskim sprejem kako bi se ispitna tijela mogla lakše izvaditi iz kalupa, a da ne dođe do pucanja uzoraka. Također, treba uzeti u obzir i djelovanje vanjskih utjecaja, poput vlage i vode.

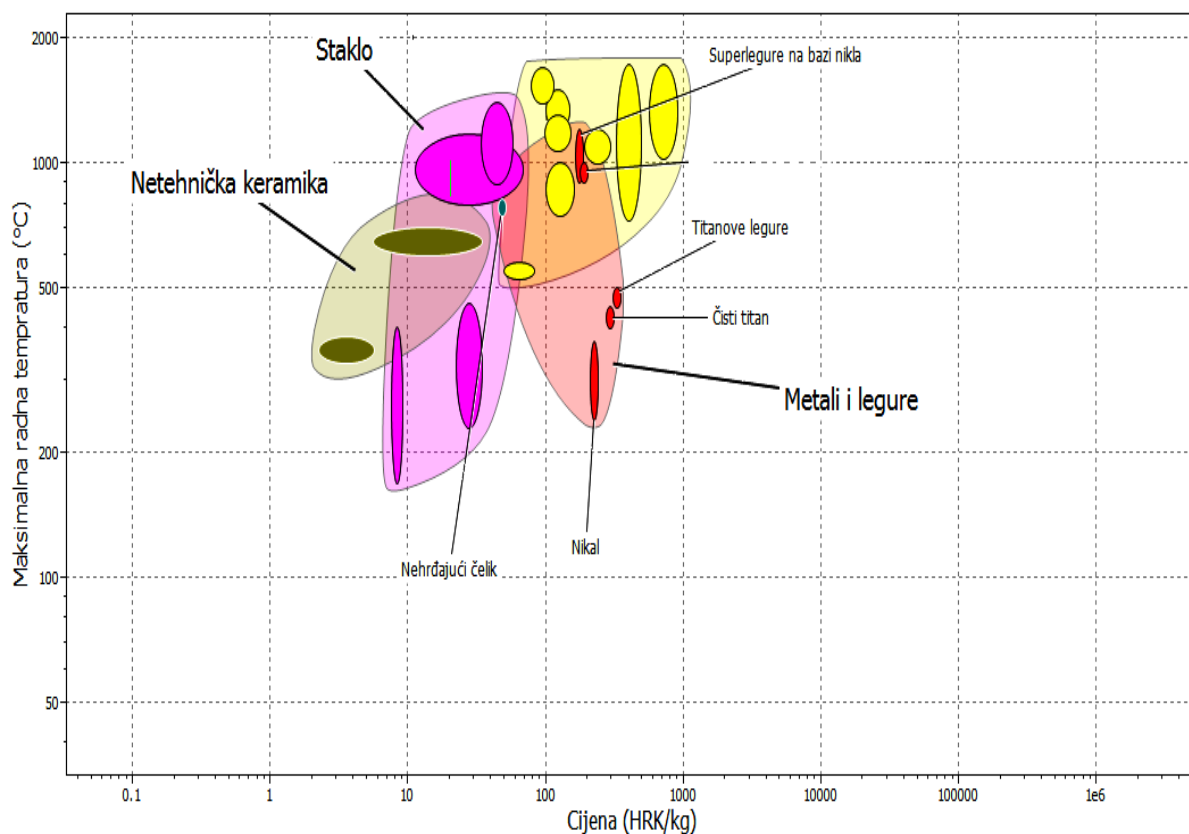
Za tekućine za bazi silikona, tj. premaze na bazi silikona postavljeni su zahtjevi izvrsne i prihvatljive postojanosti, te isto tako na svježju vodu, te vlagu.



Slika 14. Karta svojstava: Maksimalna radna temperatura – tlačna čvrstoća [15]

Iz karte svojstava vidljivo je da se broj materijala smanjio na 23 od 98. Eliminirajući sve nemetale, broj metalnih materijala se smanjio na 9 od 98. Metalni materijali koji su ponuđeni na karti svojstava su nehrđajući čelik, nikal, titanijeve legure i čisti titanij, legure na bazi nikla, bakar, volframove legure, aluminij, dok je grupa ugljičnih čelika isključena iz izbora zbog zahtjeva na kemijsku postojanost.

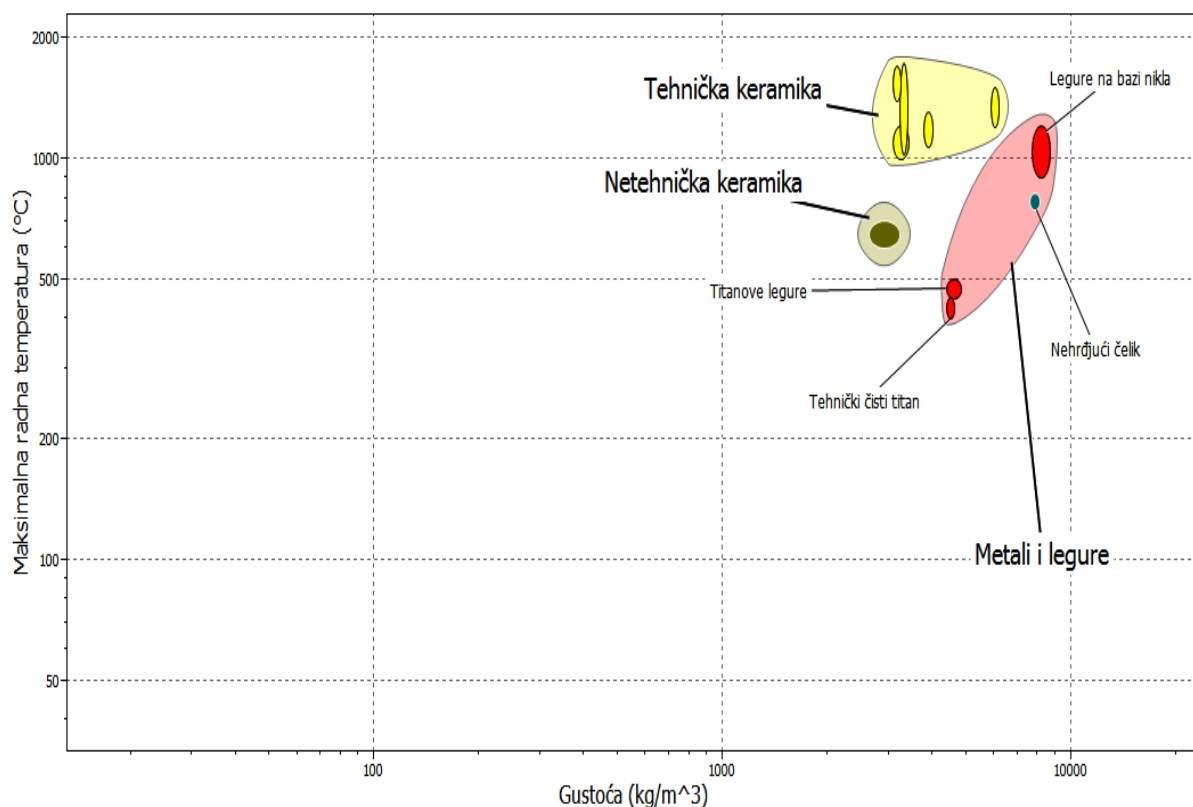
U odnosu na cijenu materijala po kilogramu broj ponuđenih materijala smanjio se na 20 od 98, od toga je 6 metala i legura, ostalo su nemetali. Na slici 15. prikazan je broj ponuđenih materijala.



Slika 15. Karta svojstava: Maksimalna radna temperatura i cijena po kg materijala [15]

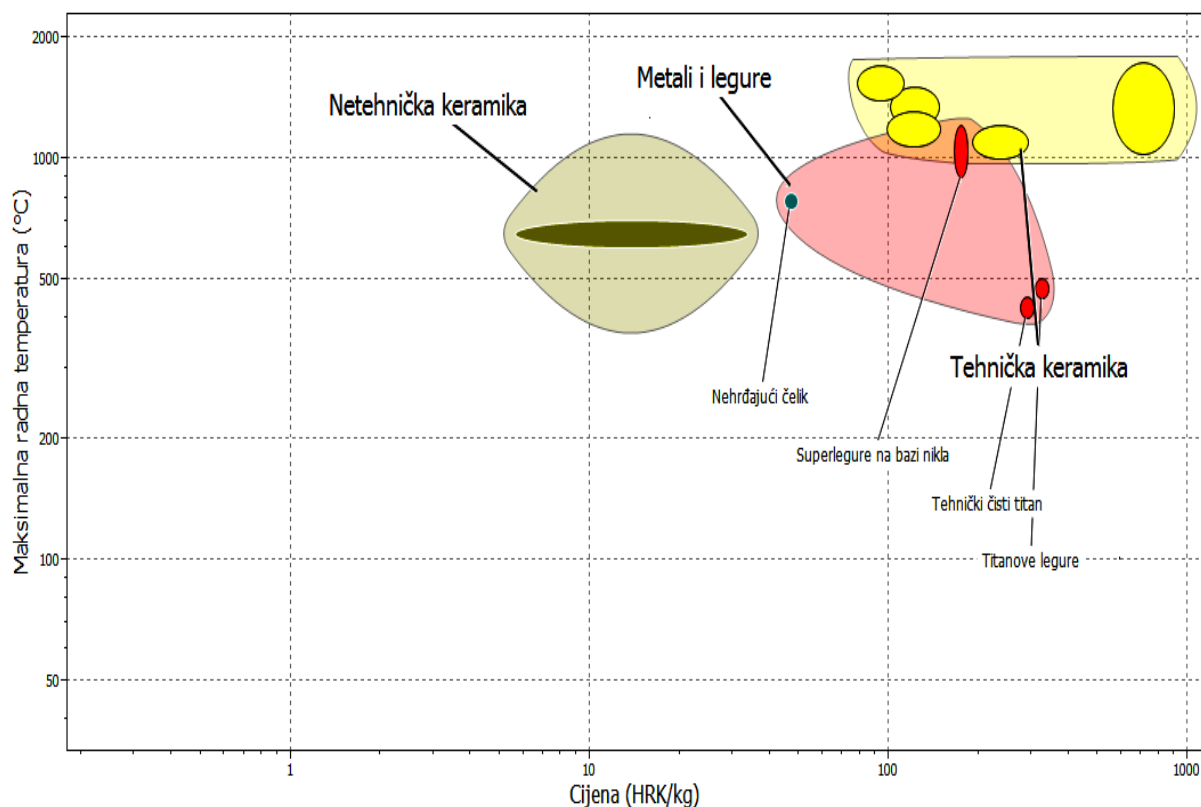
U idućem koraku postavlja se gustoća kao jedan od kriterija i to za materijale iz tablice 1. Postavljen je uvjet da je minimalna gustoća 3000 kg/m^3 , a maksimalna gustoća 8000 kg/m^3 . Gustoća je također bitna zbog jednostavnosti korištenja kalupa, pa bi bilo poželjno da je što niža, međutim to ne mora nužno biti uvjet jer su prethodni zahtjevi važniji od gustoće.

Karta svojstava pokazuje da se broj ponuđenih materijala smanjio na 10 od 98, od toga izdvojeni su metalni materijali, njih 4: legure na bazi nikla, titanijeve legure, tehnički čisti titanij i nehrđajući čelik. Metalni materijali koji su eliminirani u ovom koraku su aluminij, nikal, bakar, volframove legure, legure na bazi nikla itd.



Slika 16. Karta svojstava: Maksimalna radna temperatura – Gustoća [15]

Posljednji korak je postavljanje cijene materijala uz prethodno zadane zahtjeve i svojstva materijala. Na karti svojstava (slika 17.) prikazan je isti broj ponuđenih materijala kao u prethodnom koraku, no zbog cijene materijala vidljive u dijagramu očito je da je nehrđajući čelik jeftiniji od titanija i njegovih legura.



Slika 17. Karta svojstava: Maksimalna radna temperatura i cijena po kg materijala [15]

S obzirom da su nehrđajući čelici znatno jeftiniji u odnosu na titanij i njegove legure, te zadovoljavaju sve navedene kriterije posebice vrlo dobru žilavost, otpornost na trošenje i korozijsku postojanost, za materijal za izradu kalupa odabran je nehrđajući čelik.

Također, treba se uzeti u obzir dostupnost materijala na tržištu gdje je nehrđajući čelik na prvom mjestu po ukupnoj proizvodnji i ima vrlo široko područje primjene zbog svojih izvrsnih svojstava.

Kako postoji puno vrsta nehrđajućih čelika, za ovu svrhu odabran je nehrđajući čelik X5CrNi18-10 (W Nr. 1.430, AISI 304). Ovo je daleko najkorištenija vrsta nehrđajućeg čelika, a prednosti ovog materijala leže u tome da se može lako oblikovati i dobro zavarivati.

3.2.1. Austenitni nehrđajući čelici

Kod nehrđajućih čelika austenitni čelici su na prvom mjestu po ukupnoj proizvodnji i po broju različitih vrsta. Potpuno su otporni na opću atmosfersku koroziju pri sobnoj temperaturi. Na povišenoj temperaturi otpornost nije potpuna i s vremenom dolazi do razaranja materijala. Otpornost na opću koroziju u morskoj vodi je prilično visoka.

Minimalna granica razvlačenja na sobnoj temperaturi iznosi oko 210 N/mm². Ne mogu se toplinski očvrnuti. Zadržavaju dobra svojstva na vrlo niskim temperaturama. Maksimalna temperatura primjene je oko 760 °C, do koje ne dolazi do smanjenja čvrstoće i otpornosti na oksidaciju. Mogu se (značajno) očvrnuti hladnom deformacijom. Primjenjuju se u uvjetima kad se traži dobra postojanost na atmosfersku koroziju i koroziju na povišenoj temperaturi. Zavarljivost im je dobra.

Tablica 3. Mehanička svojstva (min.) nekih austenitnih nehrđajućih čelika na sobnoj temperaturi [17]

Čelik	Vlačna čvrstoća N/mm ²	Granica razvlačenja N/mm ²	Istezljivost %	Suženje %
X5CrNi18-10	515	205	40	50
X2CrNi18-9	480	170	40	50
X3CrNiMo17-13-3	515	205	40	50
X2CrNiMo17-12-2	480	170	40	50
X6CrNiTi18-10	515	205	40	50
X6CrNiNb18-10	515	205	40	50

Legiraju se s elementima koji osiguravaju formiranje austenitne mikrostrukture: niklom, dušikom, bakrom. Ukupni maseni udio gamagenih legiranih elemenata uglavnom prelazi 8 %. Ugljik, iako nije legirni element, također promiče austenitnu mikrostrukturu, a dodaje se i zato što povišuje otpornost na puzanje. Dušik, osim što promiče austenitnu strukturu, povišuje čvrstoću na sobnoj i niskim temperaturama.

Maseni udjeli najvažnijih legiranih elemenata i ugljika u austenitnim čelicima prikazani su u tablici 3. [17]

Tablica 4. Maseni udjeli ugljika i legirnih elemenata u austenitnim čelicima [17]

Element	Maseni udio, %
krom	16 do 26
nikal	8 do 35
mangan	1 do 2 (4 do 15,5)
silicij	0,5 do 3
molibden	do 2
dušik	do 0,15
titanij i niobij	do 0,2
Ugljik	0,02 do 0,08 (0,1)

Zbog visokog udjela legirnih elemenata austenitni čelici su skuplji od martenzitnih nehrđajućih čelika i feritnih s nižim i srednjim sadržajem kroma. Ipak, njihova dobra svojstva, osobito dobra oblikovljivost i zavarljivost, opravdavaju njihov izbor i kompenziraju razliku u cijeni.

Austenitni čelici imaju dobru duktilnost i žilavost i postižu značajnu istezljivost tijekom vlačnog opterećenja. [17]

Svi austenitni čelici mogu se prema vrsti gamagenih legirnih elemenata podijeliti u dvije podskupine:

- Austenitni nehrđajući čelici s niklom
- Ni-Mn-N – austenitni nehrđajući čelici

Prema američkom sustavu označavanja (AISI – American Iron and Steel Institute) prva podskupina pripada seriji 300, a čelici iz druge podskupine pripadaju seriji 200.

Iako je razvijeno mnoštvo različitih vrsta austenitnih čelika, vrste s oznakom 300 (po AISI sustavu) su najstarije, imaju najširu primjenu i najčešće se primjenjuju.

U tablici 4. prikazani su austenitni nehrđajući čelici koji se najčešće primjenjuju.

Većina austenitnih čelika razvijena je iz čelika 18-8 (18 % Cr i 8-10 % Ni), dodavanjem legirnih elemenata i modificiranjem sastava, čime su se postigla bolja mehanička i korozijska svojstva. [17]

Tablica 5. Kemijski sastav standardnih vrsta austenitnih nehrđajućih čelika [17]

Oznake			Maseni udio elemenata, %									
EN oznaka		USA	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	N	Ostatak
X2CrMnNiN17-7-5	1.4371	201 L	0,03	6-8	0,045	0,015	1	16-18	3,6-5,5	-	0,15-0,2	-
X12CrMnNiN17-7-5	1.4372	201	0,15	5,5-7,5	0,045	0,015	1	16-18	3,5-5,5		0,05-0,25	
X12CrMnNiN18-9-5	1.4373	202	0,15	7,5-10,5	0,045	0,015	1	17-19	4-6		0,5-0,25	
X8CrMnCuNB17-8-3	1.4597	204C	0,1	6,5-8,5	0,04	0,03	2	16-18	2	1	0,15-0,3	
X8CrNiS18-9	1.4305	303	0,1	2	0,045	0,15-0,35	1	17-19	8,0-10,0	-	0,11	Cu: 1
X5CrNi18-10	1.4301	304	0,07	2	0,045	0,015	1	17,5-19,5	8-10,5	-	0,11	-
X2CrNi18-11	1.4306	304L	0,03	2	0,045	0,015	1	18-20	10-12	-	0,11	-
X6CrNi18-10	1.4948	304H	0,04-0,08	2	0,035	0,015	1	17-19	8-11		0,1	
X5CrNiMo17-12-2	1.4401	316	0,07	2	0,045	0,015	1	16,5-18,5	10-13	2-2,5	0,11	-
X2CrNiMo17-12-2	1.4404	316L	0,03	2	0,045	0,015	1	16,5-18,5	10-13	2-2,5	0,11	-
X6CrNiMoTi17-12-2	1.4571	316Ti	0,08	2	0,045	0,015	1	16,5-18,5	10-13	2-2,5-		Ti: 0,7
X6CrNiMoB17-12-2	1.4919	316H	0,04-0,08	2	0,035	0,015	1	16,5-18,5	10-13	2-2,5-	0,11	B: 0,0015-0,005
X2CrNiMoN17-13-5	1.4439	317LMN	0,03	2	0,045	0,015	1	16,5-18,5	12,5-14,5	4-5	0,12-0,22	
X6CrNiTi18-10	1.4541	321	0,08	2	0,045	0,015	1	17-19	9-12	-		Ti: 0,7
X12NiCrSi35-16	1.4864	330	0,15	2	0,045	0,015	1-2	15-17	33-37	-	0,11	
X6CrNiNb18-10	1.4550	347	0,08	2	0,045	0,015	1	17-19	9-12			Nb: 1

Austenitni čelici primjenjuju se u vrlo različitim područjima, od nosivih konstrukcija i primjene u arhitekturi, preko kuhinjskih uređaja do medicinske opreme. Široko područje primjene imaju ne samo zbog dobre korozijske postojanosti, već i zbog dobre oblikovljivosti, zavarljivosti, izdržljivosti itd. [17]

4. EKSPERIMENTALNI DIO

Da bi se izradio kalup za ispitna tijela na bazi polimera, proučene su važeće norme za ispitivanje mehaničkih svojstava polimernih materijala i polimernih kompozita, te određeni potrebni oblici i dimenzije normiranih ispitnih tijela za pojedina mehanička svojstva.

Oblik i dimenzije ispitnih tijela napravljeni su prema normi:

- EN ISO 527-1 : 2008 za ispitivanje rastezne čvrstoće
- EN ISO 178 : 2003 za ispitivanje savojne čvrstoće
- EN ISO 14130 : 1997 za ispitivanje međuslojne čvrstoće
- EN ISO 179-1 : 2001 za ispitivanje udarnog rada loma (udarne žilavosti)
- EN ISO 14125 : 1998 za polimerne kompozite

Nakon što je odabran materijal za kalup za normirana ispitna tijela na bazi polimera, sljedeći korak bio je pravilno nacrtati tehnički crtež cijelog kalupa prema zadanim dimenzijama i važećim normama za ispitna tijela na bazi polimera. Za crtanje kalupa korišten je programski paket ProEngineer 2009.

Dimenzije kalupa iznose:

$$L = 280 \text{ mm}$$

$$b = 190 \text{ mm}$$

$$h = 4 \text{ mm}$$

gdje je:

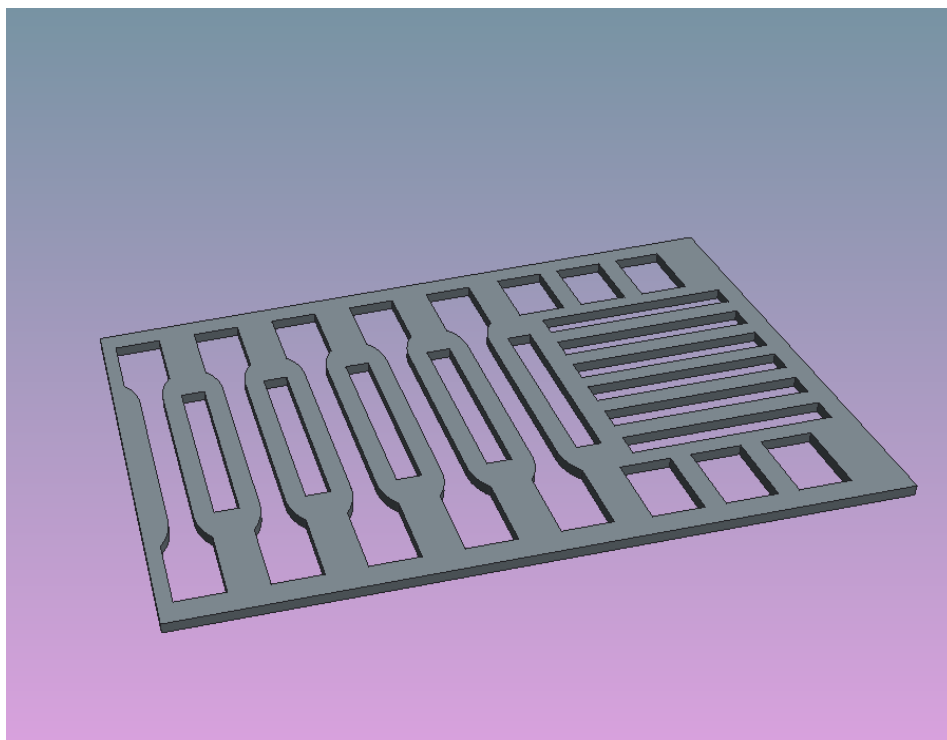
L – duljina kalupa, mm

b – širina kalupa, mm

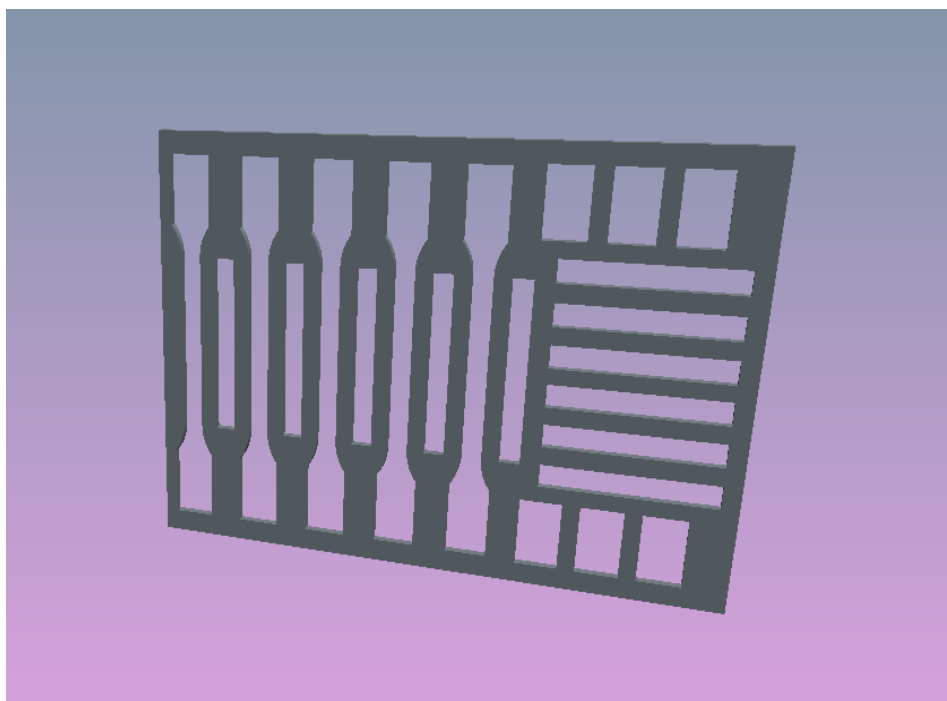
h – debljina kalupa, mm

Crtež je izrađen u mjerilu 1 : 2 kako bi se preglednije mogle očitati dimenzije i kote.

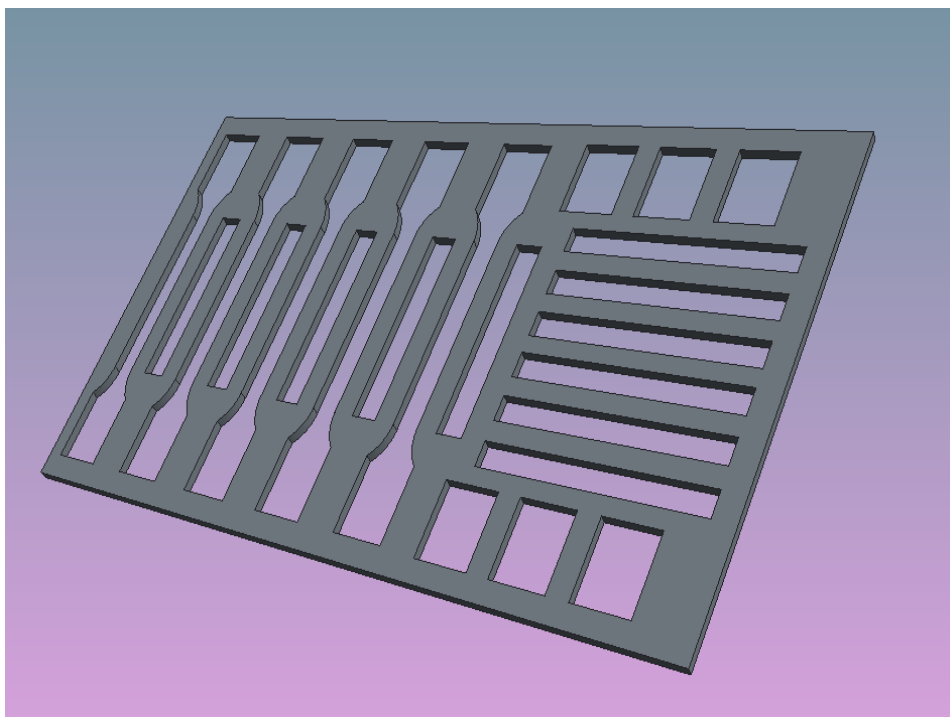
Prvo je napravljen model kalupa (slika 18., 19., 20., 21.), a zatim je u 2D napravljen nacrt koji je pravilno iskotiran te sastavnica (prilog 1).



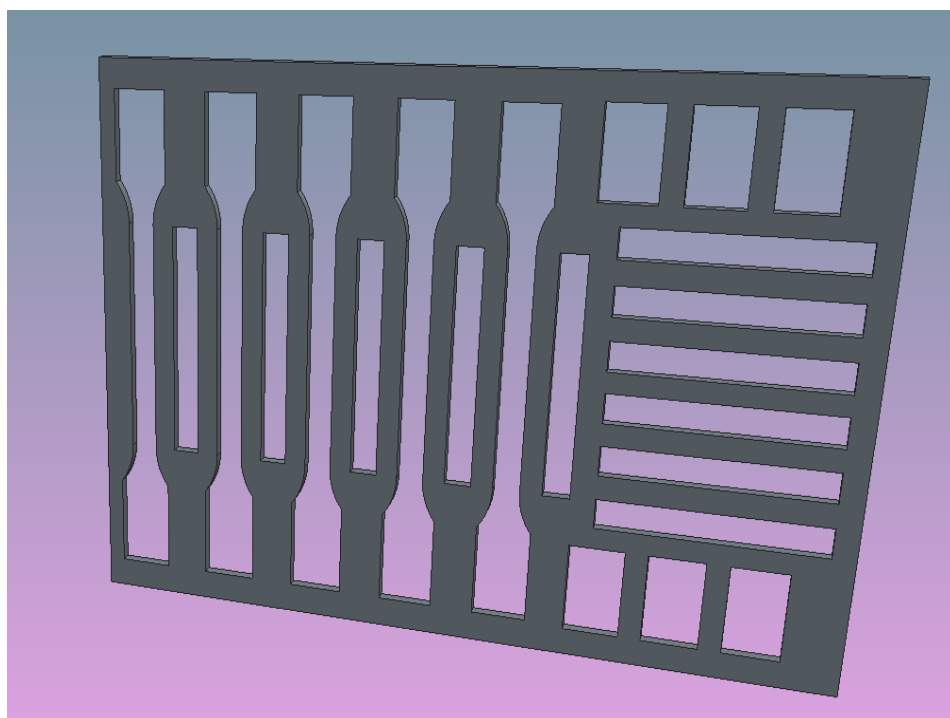
Slika 18. Model za normirana ispitna tijela (prikaz A)



Slika 19. Model za normirana ispitna tijela (prikaz B)



Slika 20. Model kalupa za normirana ispitna tijela (prikaz C)



Slika 21. Model kalupa za normirana ispitna tijela (prikaz D)

Nakon izrade crteža u mjerilu, dokument je potrebno eksportirati, tj. prebaciti u .dxf ili .dvg datoteku, koja je važna da bi CNC uređaj mogao raspoznati dimenzije i prema njima pravilno izrezati kalup.

5. IZBOR TEHNOLOGIJE IZRADE KALUPA

Zbog debljine kalupa od 4 mm i dimenzije šupljina koje su napravljene prema normama za ispitna tijela na bazi polimera preporučene su dvije tehnologije izrade kalupa:

1. Rezanje plazmom
2. Rezanje laserom

S obzirom da je riječ o vrlo tankom limu od nehrđajućeg čelika debljine 4 mm, rezanje plazmom nije najbolje rješenje za izradu kalupa jer postoji mogućnost deformacije kalupa, a samim time dolazi i do velikih odstupanja od normiranih dimenzija.

Stoga za izbor tehnologije za izradu kalupa odabrana je tehnologija rezanja laserom. Pomoću lasera moguće je vrlo precizno izrezati kalup bez odstupanja, a nakon rezanja nije potrebna naknadna obrada.

5.1. Tipovi lasera

Naziv laser je akronim od engleskih riječi: *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* (pojačavanje svjetlosti stimuliranom emisijom zračenja), a zapravo je svjetlost oscilator, odnosno kvantni generator koherentnog zračenja.

Danas, nakon više od pet desetljeća razvoja laser zauzima jedno od najvažnijih tehničkih dostignuća prošlog stoljeća. Princip rada svih lasera zasniva se na kvantnom efektu stimulirane emisije svjetlosti.

Uobičajena je podjela lasera po agregatnom stanju aktivnog materijala u tri skupine: čvrsti, tekući i plinski laser. Međutim, unutar svake skupine moguća je nova podjela s obzirom da aktivni materijali imaju različita fizikalna svojstva. Tako se čvrsti laseri zovu još i poluvodički ako je aktivni medij intrinzični poluvodič ili p-n spoj poluvodiča ili jednostavno čvrsti kada je to dielektrični kristal ili staklo. Kod plinskih lasera aktivni materijal je smjesa atoma i molekula određenih plinova, ali podjela može biti na atomske, ionske, molekularne, egzimerske, plazmene i kemijske lasere. Tekući laseri mogu biti s organskim bojama ili s posebnim otopinama aktivnih iona.

Bez obzira na mnoštvo i šarolikost aktivnih materijala svi oni moraju imati metastabilni ili dugoživući energetska nivo i nestabilan ili kratkoživući nivo i pomoćne nivoe bez kojih je nemoguće ostvariti inverziju naseljenosti među laserskim nivoima. Metastabilni laserski nivoi su osnovni kriterij da li neki materijal može biti laserski aktivan. [18]

Najpoznatiji i najčešće korišteni laseri su:

- CO₂ plinski laser
- Nd:YAG laser

5.1.1. CO₂ laseri

CO₂ laseri emitiraju svjetlost valne duljine 10,6 μm te imaju ukupnu efikasnost od otprilike 10 do 13 %. Za stvaranje laserske zrake CO₂ laseri koriste mješavinu plinova. Mješavina tih plinova se sastoji od helija, dušika, CO₂ i drugih dodataka (aditiva).

Aktivni medij lasera, plin CO₂ je stimuliran električnim pražnjenjem. Tijekom tog procesa, molekule dušika predaju energiju od sudara elektrona molekulama CO₂. Prijelaz iz višeg energetskog nivoa pobuđenih CO₂ molekula u niži energetski nivo se postiže otpuštanjem fotona, što u konačnici dovodi do stvaranja laserske zrake.

Sudaranjem molekula CO₂ s atomima helija, koji čine većinski dio plinske smjese, molekule CO₂ se vraćaju u svoje početno energetsko stanje i spremne su za ponovni ciklus. Da bi se ti procesi mogli odvijati potreban je tlak 100 – 250 hPa. Višak energije koji ne može biti upotrijebljen za stvaranje laserske zrake se pretvara u toplinu koja se odvodi iz sustava. [19]



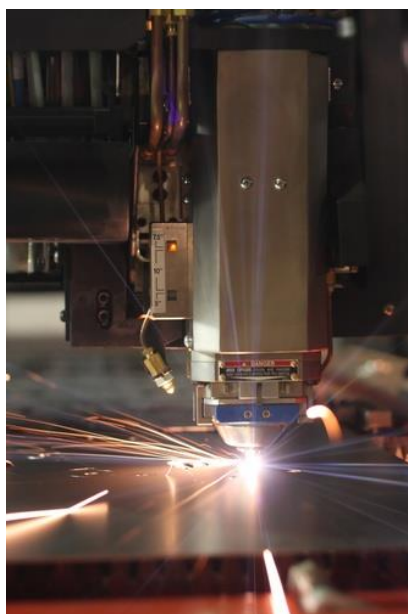
Slika 22. Lasersko rezanje CO₂ laserom [20]

5.1.2. Laser s krutim medijem (Nd:YAG)

Dok se aktivni medij u plinskim laserima sastoji od atoma, iona i molekula u plinovitom stanju (CO₂ laser), laseri s krutim medijem koriste aktivni medij u obliku kristala. Atomi u takvoj jezgri su gušći, te time manje pokretljivi nego u plinovitom stanju. Itrij-aluminij-granat (YAG) kristal ima važnu ulogu u strojnoj obradi. Ioni neodimija (Nd-3+) ili iterbija (Yb3-) mogu biti umetnuti u međuprostore u kristalnoj strukturi. Ti ioni predstavljaju aktivni medij. Kombinacijom odgovarajućeg iona s kristalnom rešetkom dobiva se Nd:YAG laser ili Yb:YAG laser.

Postoje i drugi laserski aktivni kristali kao vanadati koji imaju puno manji učinak na obradu. Većina lasera koristi neodimij kao aktivnu tvar.

U budućnosti se očekuje da će iterbij dobiti veći značaj u industrijskoj obradi, osobito uzimajući u obzir uvođenje „disc lasera“. Laseri čvrstog stanja emitiraju svjetlost valnih duljina 1064 nm odnosno 1030 nm, koje su blizu infracrvenog spektra. Prednosti lasera čvrstog stanja su izrazito fleksibilna optička vlakna koja se koriste za dovodenje laserske zrake do predmeta obrade. Mnoge materijale, osobito metale, karakterizira povećana apsorpcija valnih duljina blizu infracrvenog spektra, najmanje 10,6 μm. Različite tehnologije i oblici se upotrebljavaju za stvaranje laserske zrake s krutom tvari. [21]



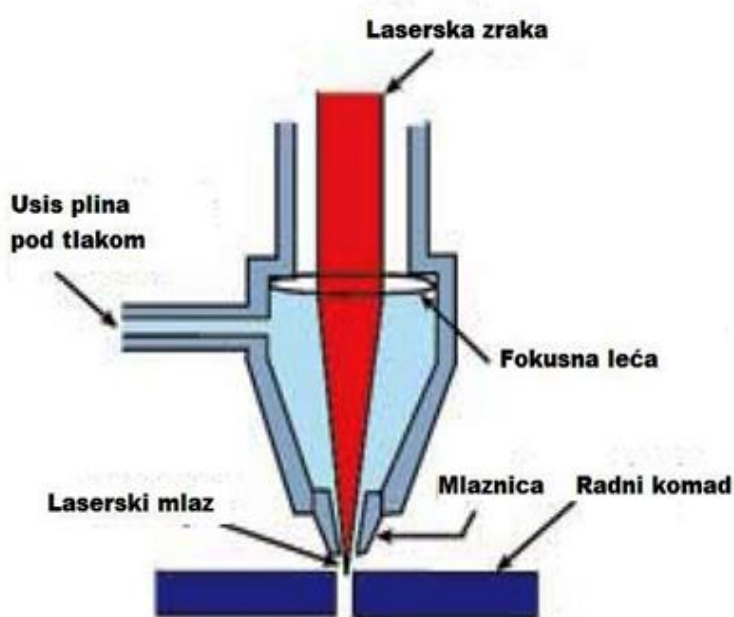
Slika 23. Lasersko rezanje Nd:YAG laserom [22]

Tablica 6. Kvaliteta reza nekih materijala rezanih Nd:YAG i CO₂ laserom [18]

Materijal	Nd: YAG laser	CO ₂ laser
Čelik	odlična	odlična
Visokoleg. neh. čelik	odlična	odlična
Aluminij	dobra	dobra
Bakar	dobra	teško se reže
Zlato	dobra	nemoguće rezati
Titan	dobra	dobra
Keramika	zadovoljavajuća	dobra
Akril	slaba	odlična
Polietilen	slaba	odlična
Polikarbonat	slaba	dobra
Šperploča	slaba	odlična

5.2. Lasersko rezanje

Lasersko rezanje je toplinski proces, u kojem je zarez formiran zagrijavanjem, fokusiran laserskom zrakom gustoće snage oko 10^4 Wmm^{-2} , u kombinaciji sa strujanjem aktivnog ili inertnog plina. Fokusirana laserska zraka tali materijal, a mlaz plina pod tlakom otpuhuje rastaljeni materijal od zareza. Osnovni princip laserskog rezanja prikazan je na slici 24. [23]



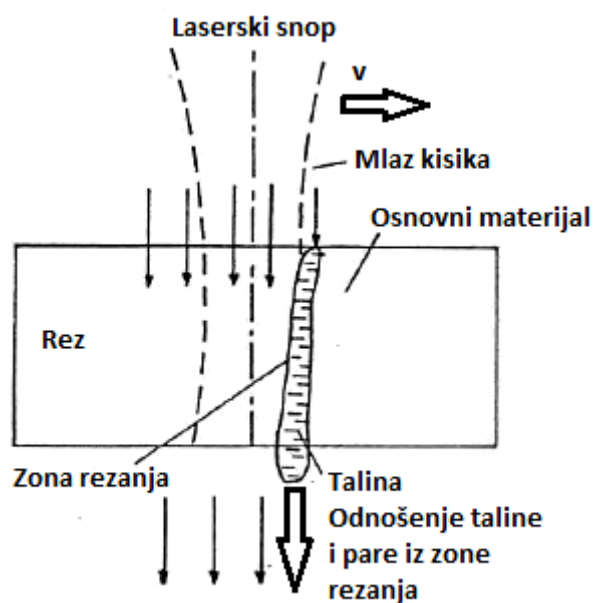
Slika 24. Princip laserskog rezanja [24]

Zaštitni plin igra vrlo važnu ulogu u procesu laserskog rezanja:

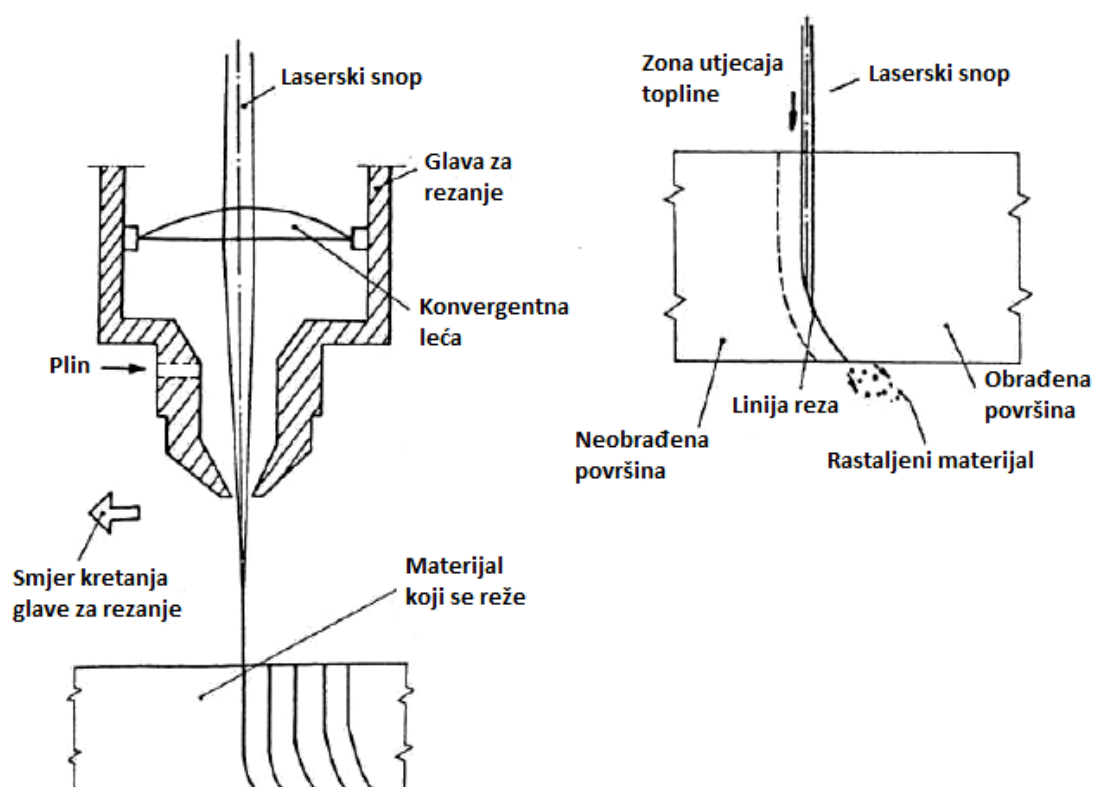
- Štiti leću od isparenih produkata nastalih tijekom rezanja
- Uklanja paru između leće i radnog komada koja bi mogla apsorbirati lasersko zračenje
- Kod rezanja nekih materijala (npr. aluminij, titan, čelik i sl.) plin egzotermno reagira s talinom i tako povećava brzinu rezanja
- Ispuhuje talinu iz zone rezanja

Plin se najčešće dovodi kroz komoru na kraju koje je sapnica koja usmjerava plin paralelno s laserskim snopom. [18]

Za rezanje nemetala koristi se komprimirani zrak, za čelike najčešće kisik, a u slučaju nehrđajućih čelika dušik. [25]



Slika 25. Primjena laserskog snopa u obradi materijala rezanjem [25]



Slika 26. Usmjeravanje laserskog snopa u zonu rezanja [25]

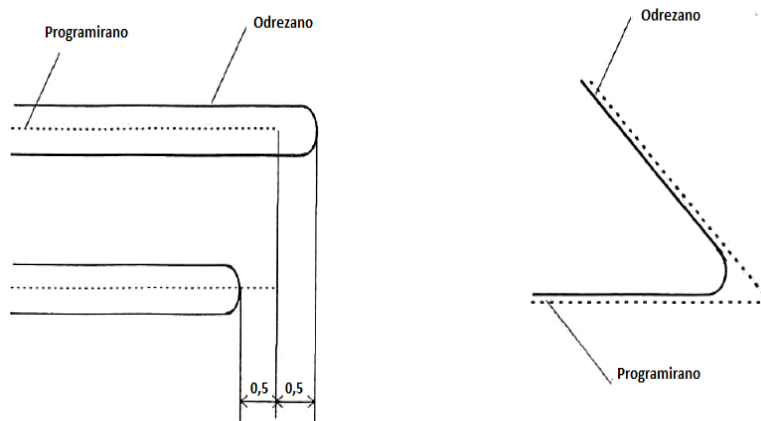
Glavne prednosti primjene lasera za rezanje su:

- Mala širina reza (0,2 mm)
- Mala zona utjecaja topline (0,1 mm)
- Nema trošenja alata
- Jednostavno pridržavanje radnih komada jer se ne primjenjuje mehanička sila
- Pogodnost za automatizaciju
- Mogućnost rezanja raznih vrsta materijala [18]

Također valja spomenuti jednu od najvažnijih prednosti, a to je da prilikom laserskog rezanja materijala nema škarta i izradak je točnih dimenzija pa nije potrebna naknadna obrada.

Dimenzijska točnost ovisi o:

- Točnosti pozicioniranja snopa
- Orijentaciji snopa (smjeru rezanja i okomito na smjer rezanja)
- Redoslijedu rezanja [25]



Slika 27. Točnost pozicioniranja snopa i točnost izrezane konture [25]

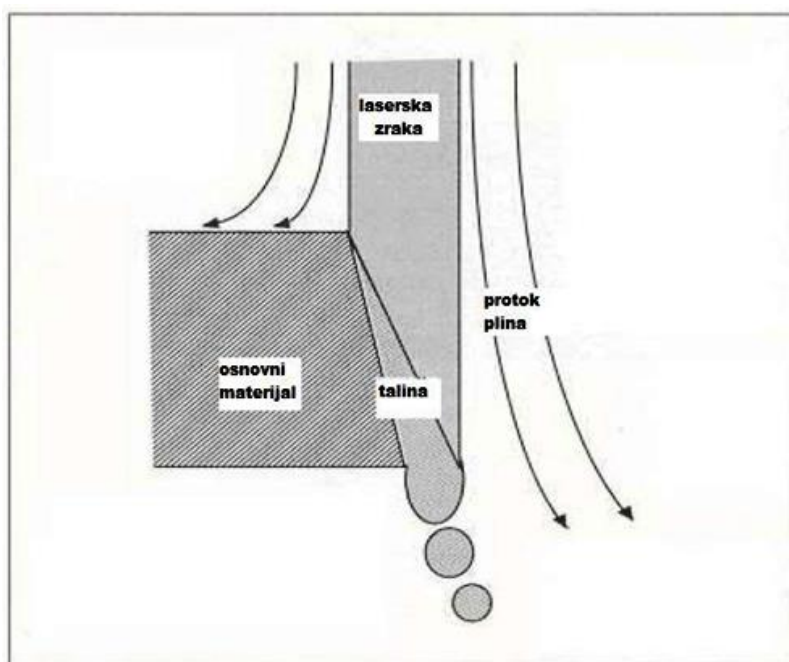
Lasersko rezanje se može podijeliti po mehanizmu rezanja na:

1. Lasersko rezanje taljenjem (rezanje inertnim plinom)
2. Lasersko rezanje kisikom
3. Lasersko rezanje isparavanjem

5.2.1. Lasersko rezanje taljenjem

Postupak laserskog rezanja taljenjem se bazira na taljenju materijala u zarezu laserskom zrakom i ispuhivanju mlazom inertnog plina pod visokim tlakom.

Laserska zraka je jedini izvor topline u procesu, dok mlaz inertnog plina samo otpuhuje talinu iz reza. Inertni plin (uglavnom dušik i/ili argon) također štiti talinu reza od vanjskih nečistoća te štiti lasersku sapnicu. [23] Na slici 28. je prikazan postupak laserskog rezanja taljenjem.



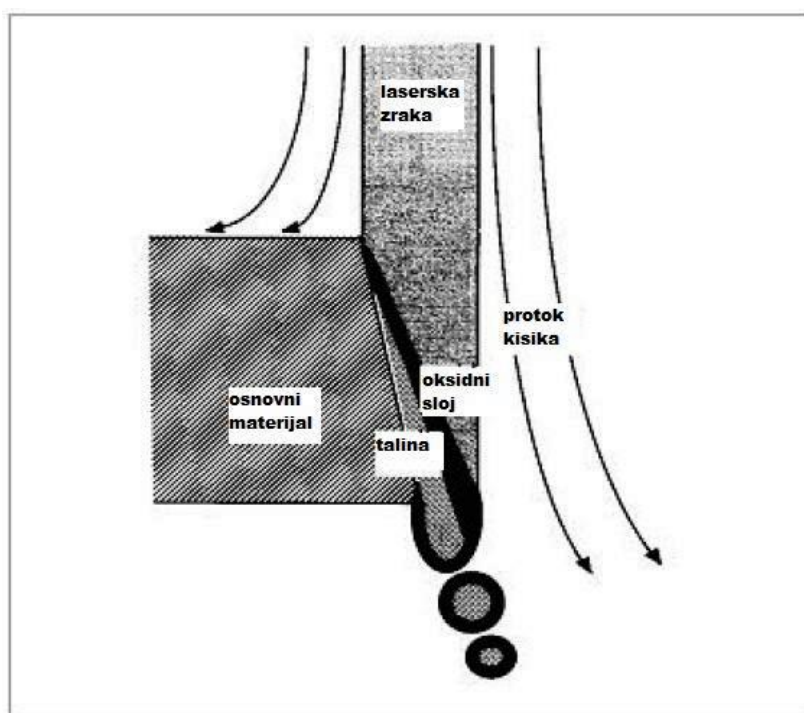
Slika 28. Postupak laserskog rezanja taljenjem [23]

Lasersko rezanje taljenjem je primjenjivo kod svih metala posebno kod nehrđajućih čelika i drugih visokolegiranih čelika, aluminijских i titanijevih legura. Kvaliteta reza je velika, ali su brzine rezanja relativno male u usporedbi s postupcima rezanja s aktivnim plinom. Prednost ovog postupka je da rez nema oksida te ima istu otpornost na koroziju kao i osnovni materijal. Pozicije rezanja se mogu zavarivati bez naknadne obrade. Glavna tehnološka poteškoća je izbjeći srh na rubovima reza, što se rješava visokim tlakom inertnog plina, iznad 10 bar. [23]

5.2.2. Lasersko rezanje kisikom

Kod laserskog rezanja kisikom fokusirana laserska zraka zagrijava materijal u oksidnoj atmosferi te potiče egzotermnu oksidaciju materijala. Egzotermna oksidacija pomaže laserskom rezanju omogućujući dodatni unos topline, što rezultira većim brzinama rezanja u usporedbi s rezanjem inertnim plinom. Laserska zraka uspostavlja se i stabilizira izgaranje u rezu, dok pomoćni plin otpuhuje rastaljeni materijal iz zone rezanja te štiti optiku lasera. [23]

Na slici 29. prikazan je postupak laserskog rezanja kisikom.



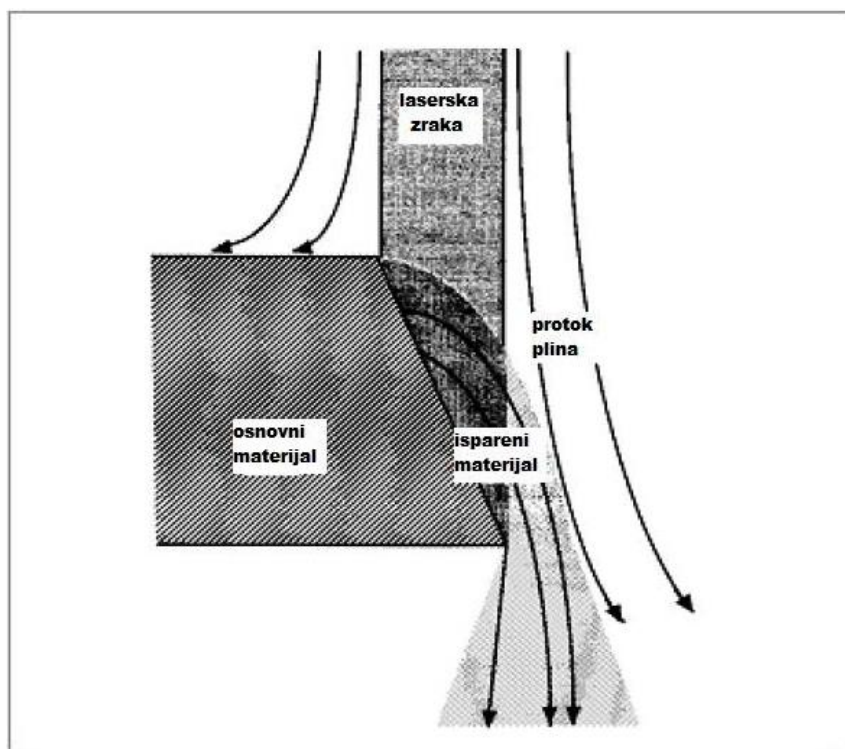
Slika 29. Postupak laserskog rezanja kisikom [23]

Lasersko rezanje kisikom je primjenjivo za nelegirane i niskolegirane čelike. Formiranjem oksidnog sloja u zoni reza smanjuje se viskoznost i površinska napetost taline, što pojednostavljuje ispuhavanje taline. [23]

5.2.3. Lasersko rezanje isparavanjem

Za vrijeme laserskog rezanja isparavanjem materijal se grije iznad temperature taljenja te u konačnici isparava. Mlaz plina služi za ispuhavanje isparenog materijala iz zone rezanja da se izbjegne kondenzacija materijala u formiranom rezu.

Slika 30. prikazuje princip rada laserskog rezanja isparavanjem. [23]



Slika 30. Postupak laserskog rezanja isparavanjem [23]

Tipični materijali koji se režu isparavanjem su akrili, polimeri, drvo, papir, koža i neke keramike. Ovaj postupak ima velike zahtjeve na snagu koji ovise o termičkim svojstvima materijala koji se reže.

Visoka gustoća zrake se postiže pravilnim podešavanjem laserske radijacije i žarišta. Za rezanje metala, lasersko rezanje isparivanjem je najsporija metoda između spomenutih, međutim prikladna je za precizne i komplicirane izratke [23].

5.2.4. Brzina rezanja

Energija korištena za lasersko rezanje se dijeli na dva dijela: energiju potrebnu da se napravi rez i gubitke energije u zoni rezanja. Energija korištena za vrijeme rezanja je neovisna o vremenu rezanja, ali energija koja se gubi u zoni rezanja je proporcionalna vremenu potrebnom da se ostvari rez. Stoga gubitak energije u zoni rezanja se smanjuje povećanjem brzine rezanja, što direktno utječe na iskoristivost procesa. Razina gubitka kondukcijom, koji je najznačajniji gubitak u zoni rezanja za većinu metala, strahovito raste povećanjem debljine materijala i snižavanjem brzine rezanja.

Brzine rezanja moraju biti usklađene s protokom plina i snagom. Porastom brzine rezanja raste pojava crta na rubu reza, dok je s druge strane penetracija jako smanjena.

Kod korištenja kisika, niske brzine rezanja rezultiraju povećanim gorenjem na rubovima reza što umanjuje kvalitetu reza te povećava zonu utjecaja topline.

Općenito, brzina rezanja je obrnuto proporcionalna debljini materijala. Brzina mora biti reducirana kada se režu oštri kutovi sa smanjenjem snage da se izbjegnu izgaranja. [26]

5.3. AMADA LASMAC – laser za rezanje limova

Obzirom da je odabrana tehnologija za izradu kalupa lasersko rezanje, kalup za normirana ispitna tijela izrađen je u poduzeću Elektrotehnika d.o.o. u Križevcima.

Poduzeće Elektrotehnika d.o.o. vodeće je poduzeće specijalizirano za konstruiranje i proizvodnju rashladnih, mljekarskih, elektrotehničkih i strojarskih uređaja.

Utemeljeno je 1975. godine. Proizvodnja u poduzeću odvija se na najmodernijim CNC strojevima i uređajima čime se osigurava najviša razina kvalitete proizvoda.



Slika 31. Poduzeće Elektrotehnika d.o.o. Križevci [27]

Poduzeće raspolaže sa dva uređaja za lasersko rezanje:

1. BALLIU MEGACUT 6A – Laser za rezanje i zavarivanje limova (2D i 3D)
2. AMADA LASMAC – Laser za rezanje limova (2D)



Slika 32. BALLIU MEGACUT 6A – Laser za rezanje i zavarivanje limova (2D i 3D) [27]



Slika 33. AMADA LASMAC – Laser za rezanje limova (2D) [27]

Za rezanje kalupa korišten je AMADA LASMAC – laser za rezanje limova (2D). AMADA LASMAC laser je zapravo CO₂ laser. Maksimalne dimenzije materijala za rezanje su 1500 x 3000 mm.

Maksimalne debljine rezanja AMADA LASMAC laserom su:

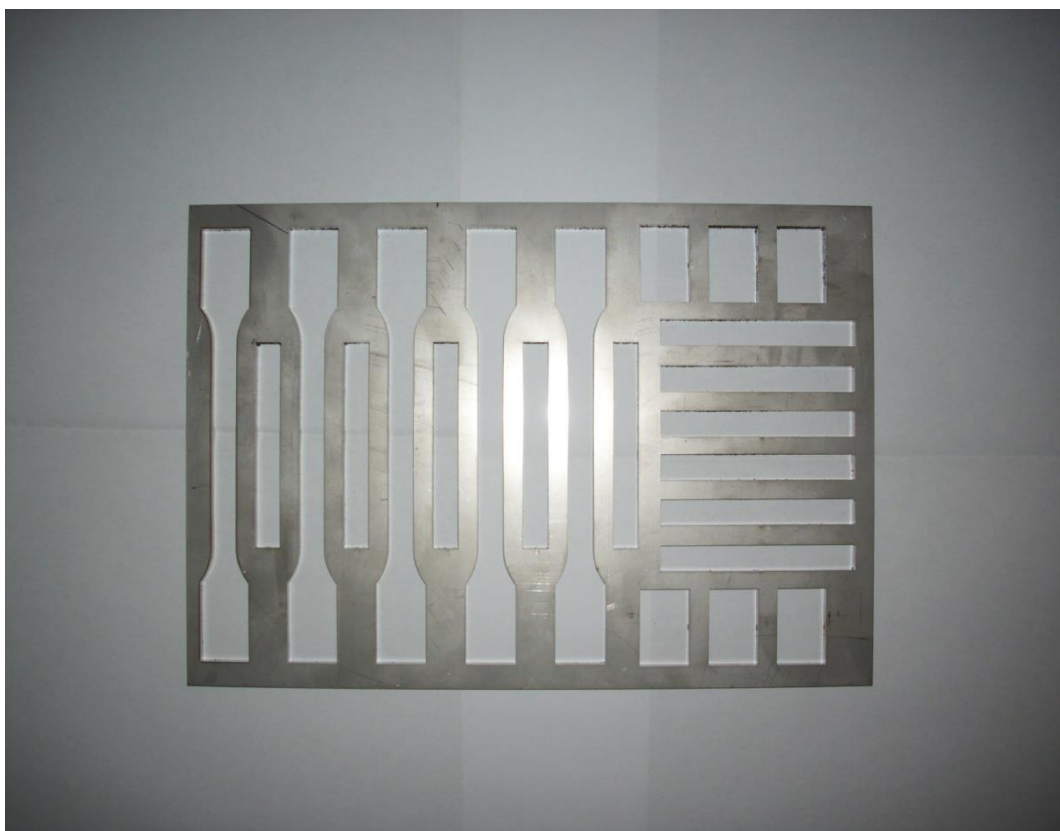
- Čelik – do 12 mm
- Nehrđajući čelik – do 6 mm
- Aluminijski – do 4 mm [27]

Rezanje kalupa od nehrđajućeg čelika provedeno je metodom laserskog rezanja taljenjem, opisanog u prethodnom poglavlju.



Slika 34. Prikaz rezanja limova AMADA LASMAC laserom [28]

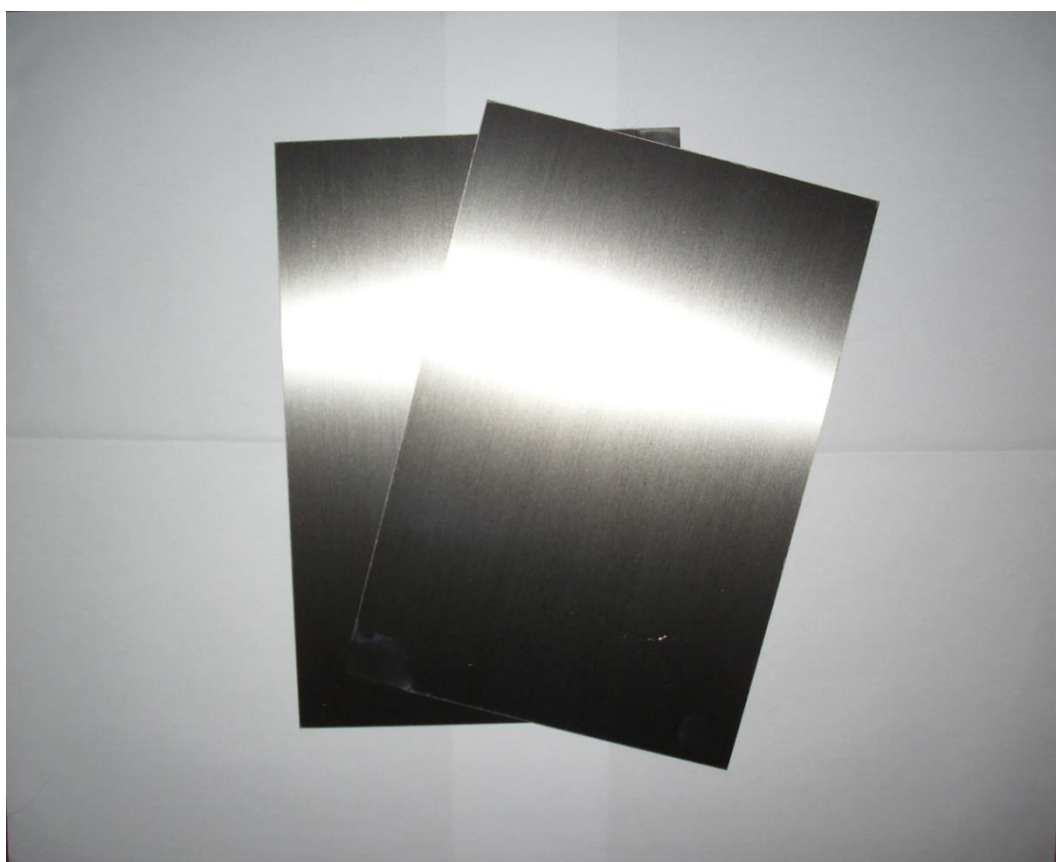
Gotov proizvod kalupa za normirana ispitna tijela na bazi polimera prikazan je na slici 35.



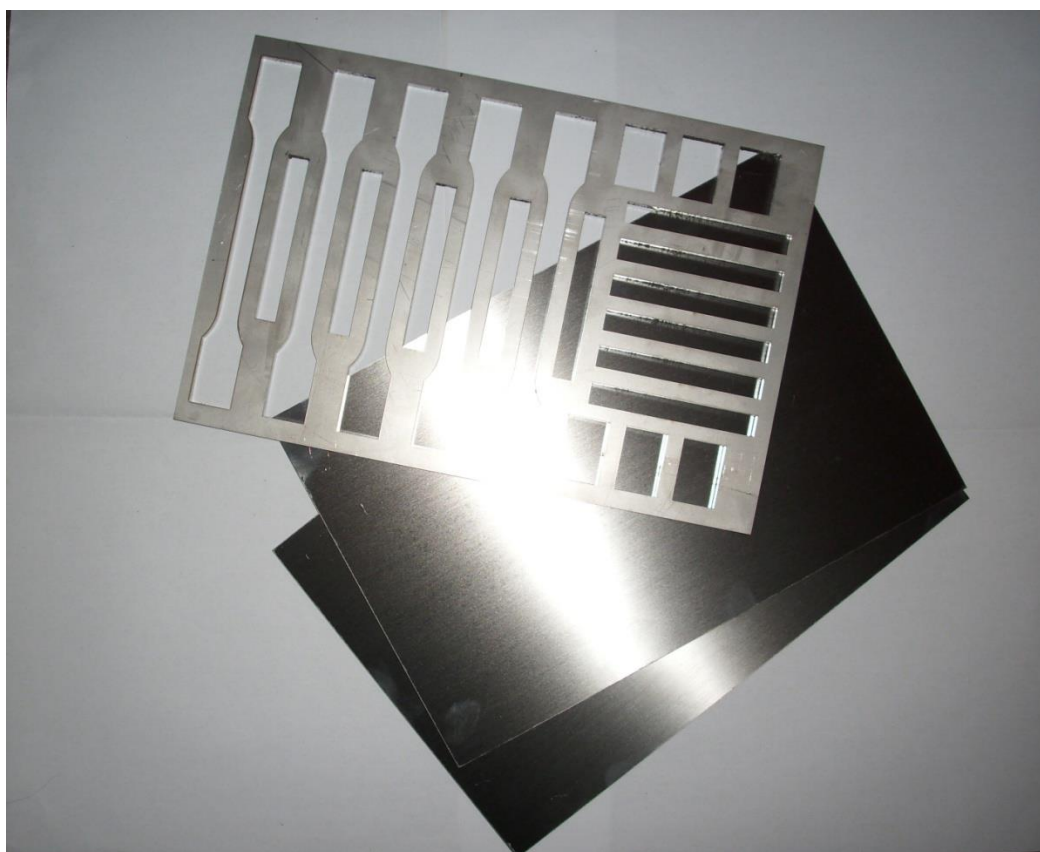
Slika 35. Kalup za normirana ispitna tijela na bazi polimera

S obzirom da prilikom korištenja kalupa treba voditi računa da nakon hlađenja određene suspenzije od polimera ili kompozita ne dođe do lijepljenja za podlogu preše, izrezane su još dvije ploče od nehrđajućeg čelika, istih dimenzija, debljine 2 mm. Jedna ploča postavlja se na kalup, a druga ispod kalupa. Ploče od nehrđajućeg čelika prikazane su na slici 36.

Također treba voditi računa da se za pojedine smjese mora koristiti silikonski sprej koji se nanosi na rubove kalupnih šupljina radi lakšeg vađenja ispitnih tijela.



Slika 36. Ploče od nehrđajućeg čelika debljine 2 mm



Slika 37. Kalup za normirana ispitna tijela i zaštitne ploče od nehrđajućeg čelika

5.4. Ekonomičnost

Pri određivanju ekonomičnosti primjene lasera za rezanje i općenito za obradu materijala mora se kao i pri svim ostalim analizama ekonomičnosti uzeti u obzir investicijski i operativni trošak.

Investicijski troškovi pri nabavi i instaliranju laserskog sustava su vrlo visoki u odnosu na ostale postupke rezanja (plazma, plinsko rezanje) i treba dobro razmotriti uvođenje tog postupka. [18]

U tablici 7. je prikazan postotak svjetske primjene lasera za pojedine postupke obrade materijala prema "The Industrial Laser Handbook". [25]

Tablica 7. Primjena laserskog snopa u obradi materijala [25]

Postupak	Postotak svjetske primjene, %
Rezanje	31
Označavanje	20
Zavarivanje	19
Čišćenje	14
Bušenje	4
Površinska obrada	2
Ostalo	10

Glavni razlozi za primjenu lasera u obradi materijala su:

1. Smanjenje vremena protoka dijelova u proizvodnji (povećanje fleksibilnosti)
2. Pобољшanje kvalitete proizvoda
3. Proizvodnja novih proizvoda koje je teško proizvoditi ili čak ne moguće proizvoditi drugim tehnološkim postupcima
4. Povećanje stupnja automatizacije
5. Smanjenje troškova materijala, alata i ljudskog rada. [25]

6. ZAKLJUČAK

Mehanička svojstva materijala vrlo su važna jer se pomoću njih može objektivno ocijeniti kvaliteta nekog materijala prilikom kontrole poluproizvoda ili proizvoda.

Kod ispitivanja polimernih i kompozitnih materijala, prethodno se izrađuju ploče taljenjem u pravokutnom pločastom kalupu na preši ili se pripremljeni materijali ulijevaju u kalup ako se radi o suspenziji, te se nakon prešanja i hlađenja iz ploča izrezuju ispitna tijela. Sama izrada takvih ispitnih tijela je dugotrajna i nakon rezanja postoje dimenzijska odstupanja. Da bi se izbjegla odstupanja i skratilo vrijeme potrebno za izradu ispitnih tijela, proučene su norme za ispitna tijela na bazi polimera, te konstruiran i napravljen kalup sa šupljinama s propisanim oblikom i dimenzijama normiranih ispitnih tijela.

Izborom materijala za kalup odabrani su nehrđajući čelici jer zadovoljavaju sve postavljene zahtjeve. Nehrđajući čelici imaju široko područje primjene zbog svoje korozijske postojanosti, ali i zbog dobre izdržljivosti, zavarljivosti, oblikovljivosti itd. Za tehnologiju izrade kalupa odabrana je tehnologija laserskog rezanja jer kod takve tehnologije nema deformacije materijala, niti odstupanja od navedenih dimenzija te nije potrebna naknadna obrada, već je proizvod spreman za korištenje.

Kalup za normirana ispitna tijela na bazi polimera ubrzat će izradu ispitnih tijela i olakšati daljnja ispitivanja važna za razvoj novih materijala.

LITERATURA

- [1] Franz, M.: Mehanička svojstva materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2005.
- [2] Kladarić, I.: Mehanička svojstva materijala, Statički vlačni pokus, Podloge za predavanja Materijali I, Strojarski fakultet, Slavonski Brod
- [3] Franz, M., Kovačiček, F., Novosel, M., Indof, J.: Inženjerski priručnik ip4, 1. svezak, Školska knjiga, Zagreb, 1998.
- [4] Landek, D.: Materijali i proizvodni postupci 2012./2013. autorizirana predavanja iz područja materijala
- [5] Cajner, H., Šakić, N.: Autorizirana predavanje iz kolegija Optimiranje i planiranje pokusa, FSB, Zagreb, 2011.
- [6] Mehaničke osobine materijala,
<http://polj.uns.ac.rs/Files/materijali/8%20Mehanicke%20osobine.pdf> 22.11.2015.
- [7] Kladarić, I.: Mehanička svojstva materijala, Ispitivanje tvrdoće, Podloge za predavanja Materijali I, Strojarski fakultet, Slavonski Brod
- [8] Kladarić, I.: Mehanička svojstva materijala, Ispitivanje udarne radnje loma, Podloge za predavanja Materijali I, Strojarski fakultet, Slavonski Brod
- [9] Golubić, S., Čikić, A., Hršak, B.: Primjena kvantitativnih metoda kod izbora materijala, Tehnički glasnik, 2012., str. 1
- [10] Boldin, M.: Diplomski rad, Slama kao ojačalo u biorazgradivim polimernim kompozitima, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2013.
- [11] Rezultati pretraživanja _ Struna _ Hrvatsko strukovno nazivlje, <http://struna.ihjj.hr> 28.11.2015.
- [12] Šimunović, N.: Završni rad, Konstrukcija i tehnologija izrade uređaja za ispitivanje udarne žilavosti, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, Split, 2014.
- [13] Ljumović, P.: Specijalistička praksa/specijalistički projekt, Analiza triboloških mehanizama trošenja na kalupima za visoko-tlačno lijevanje, FESB, Splitu 2013.
- [14] Filetin, T.: Izbor alatnih čelika za dijelove kalupa za preradu polimera, Podloge za predavanja Izbor materijala, 1.11.2006.
- [15] Programski paket: CES EduPack 2009, Verzija 5.1.0, Inačica: 2009.

- [16] Filetin, T.: Izbor materijala pri razvoju proizvoda, Zagreb, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2000.
- [17] Rede, V.; Austenitni nehrđajući čelici, www.fsb.unizg.hr
- [18] Kožuh, Z., Kralj, S., Misir, T.: Priručnik Laserska tehnika, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [19] Rofin: Introduction to Industrial Laser Materials Processing; Hamburg, 2006.
- [20] CO2 laser cutting machine _ CNC _ compact - QUATTRO series – AMADA, <http://www.directindustry.com>, 15.12.2015.
- [21] Bauer, B.: Doktorski rad, Optimiranje parametara laserskog zavarivanja čelika za poboljšavanje, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2006.
- [22] Sheet Metal Fabrication, Laser Cutting, Sheet Metal Design _ Call 972-221-6277, <http://www.bullochfab.com>, 16.12.2015.
- [23] Vlahov, M.: Diplomski rad, Optimizacija parametara laserskog rezanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2013.
- [24] Custom Online CNC Machine Shop _ Free CAD Software, <http://www.emachineshop.com/machines-kerf/laser-cutting.htm>, 11.12.2015.
- [25] Stoić, A.: Magistarski rad, Optimiranje procesa rezanja laserskim snopom, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1996.
- [26] Ion, J.: “Laser Processing of Engineering materials”, 2005.
- [27] Elektrotehnika d.o.o., <http://www.elektrotehnika.hr>, 14.12.2015.
- [28] Laserkop van Amada FO-4020NT 4kW industriale laser, <http://www.common.wikimedia.org>, 20.12.2015.

PRILOZI

- I. CD-R disk
- II. Tehnička dokumentacija

